



**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

## **STUDI PEMILIHAN BASIS *WAVELET* UNTUK DETEKSI GEJALA FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK**

Verdiansyah  
NRP 07111440000121

Dosen Pembimbing  
Dimas Anton Asfani, ST. MT. Ph.D.  
IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI PEMILIHAN BASIS *WAVELET* UNTUK  
DETEKSI GEJALA FERORESONANSI PADA SISTEM  
TENAGA LISTRIK**

Verdiansyah  
NRP 07111440000121

Dosen Pembimbing  
Dimas Anton Asfani, ST. MT. Ph.D.  
IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018





FINAL PROJECT - TE 141599

## **STUDY OF WAVELET FILTER SELECTION FOR DETECTION OF FERRORESONANCE PHENOMENON IN POWER SYSTEM**

Verdiansyah  
NRP 07111440000121

Supervisors  
Dimas Anton Asfani, ST. MT. Ph.D.  
IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**STUDI PEMILIHAN BASIS *WAVELET* UNTUK DETEKSI GEJALA FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 16 Juli 2018



Verdiansyah  
07111440000121

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**STUDI PEMILIHAN BASIS *WAVELET* UNTUK DETEKSI  
GEJALA FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dimas Anton Asfani, ST, MT, Ph.D.**  
**NIP. 198109052005011002**

**IGN Satriyadi Hernanda, ST, MT.**  
**NIP. 197301232002121001**



**SURABAYA  
JULI, 2018**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **STUDI PEMILIHAN BASIS *WAVELET* UNTUK DETEKSI GEJALA FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK**

Nama mahasiswa : Verdiansyah

Dosen Pembimbing I : Dimas Anton Asfani, ST. MT. Ph.D.

Dosen Pembimbing II : IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT.

## **ABSTRAK**

Feroresonansi adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan fenomena resonansi non-linear yang merupakan hasil interaksi antara kapasitansi dan induktansi non linear. Feroresonansi menyebabkan kenaikan arus dan tegangan yang tinggi sehingga dapat menyebabkan kerusakan peralatan kelistrikan dan akhirnya dapat mengganggu sistem kelistrikan. Permasalahan utama pada fenomena ini adalah kompleksnya fenomena ini dalam pendeteksian, pencegahan, serta penanganannya. Transformasi *wavelet* merupakan salah satu metode untuk menganalisis pendeteksian feroresonansi. Tujuan dari studi ini adalah dapat mengetahui basis *wavelet* yang tepat untuk mendeteksi fenomena feroresonansi. Pada studi ini, pendeteksian feroresonansi dilakukan dengan menganalisa perubahan yang signifikan pada nilai koefisien detail sinyal mode feroresonansi hasil transformasi diskrit *wavelet* (DWT) menggunakan perangkat lunak MATLAB. Pemilihan basis *wavelet* dilakukan dengan dua metode. Metode pertama yaitu menganalisa kecepatan deteksi dan rasio nilai koefisien detail yang terdeteksi terhadap nilai *threshold*. Metode kedua adalah dengan melakukan perbandingan rasio perhitungan energi kumulatif pada kondisi normal dan kondisi feroresonansi. Basis *wavelet* yang digunakan adalah 54 basis *wavelet* yang tersedia pada DWT perangkat lunak MATLAB. Berdasarkan studi yang telah dilakukan pada metode pertama, *mother wavelet coif5* menunjukkan performansi pendeteksian yang unggul dibandingkan dengan *mother wavelet* lainnya dengan mendeteksi lebih cepat secara konsisten pada setiap mode feroresonansi. Pada metode kedua, *mother wavelet rbio3.3* secara konsisten menghasilkan rasio energi kumulatif yang lebih besar dibanding dengan *mother wavelet* lainnya.

**Kata kunci:** Deteksi, Feroresonansi, Transformasi *Wavelet* Diskrit, *Mother Wavelet* .

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **STUDY OF WAVELET FILTER SELECTION FOR DETECTION OF FERORESONANCE PHENOMENON IN POWER SYSTEM**

Student Name : Verdiansyah  
Supervisor I : Dimas Anton Asfani, ST. MT. Ph.D.  
Supervisor II : IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT.

## **ABSTRACT**

Feroresonance is a term used to describe the phenomenon of non-linear resonance that results from the interaction between the capacitance and iron core inductance. Feroresonance causes high overcurrent and overvoltage causing electrical equipment damage and can eventually disrupt the electrical system. The main problem of this phenomenon is the complexity of this phenomenon in the detection, prevention, and appropriate action. Wavelet transformation is one method to analyze the detection of feroresonance. The purpose of this study is to find out the best mother wavelet to detect the feroresonance phenomenon. In this study, the detection of feroresonance was done by analyzing the significant changes in the value of the feroresonance signal details coefficient as a result of discrete wavelet transformation (DWT) performed using MATLAB software. Selection of mother wavelet is done by two methods. The first method is to analyze the detection speed and the ratio of the detected detail coefficient value to the threshold value. The second method is to compare the ratio of cumulative energy calculations under normal conditions and feroresonance conditions. The wavelet base used is 54 mother wavelets available on DWT MATLAB software. Based on studies that have been done on the first method, mother wavelet *coif5* shows superior detection performance compared to other mother wavelets by consistently faster detection in each feroresonance mode. In the second method, mother wavelet *rbio3.3* consistently results larger cumulative energy ratio compared to other mother wavelets.

**Key Word: Detection, Feroresonance, Discrete Wavelet Transform, Mother Wavelet.**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“STUDI PEMILIHAN BASIS WAVELET UNTUK DETEKSI GEJALA FERORESONANSI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Bapak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Dimas Anton Asfani, ST. MT. Ph.D. dan Bapak IGN Satriyadi Hernanda, ST. MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang nyaman.
5. Seluruh teman-teman asisten laboratorium tegangan tinggi yang telah membantu dan memfasilitasi pengerjaan tugas akhir ini.
6. Teman-teman kos Kupat yang telah menghibur dan memberikan semangat disaat pengerjaan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Sistematika Penulisan.....	3
1.3 Relevansi.....	4
<b>BAB II FERORESONANSI DALAM SISTEM</b>	
<b>TENAGA LISTRIK.....</b>	<b>5</b>
2.1 Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.1.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik.....	6
2.1.2 Gardu Induk .....	7
2.2 Transformator.....	7
2.2.1 Rangkaian Ekuivalen Transformator.....	9
2.2.2 Kurva Magnetisasi Inti Transformator .....	9
2.3 Fenomena Feroresonansi.....	10
2.3.1 Resonansi .....	10
2.3.2 Feroresonansi .....	11
2.3.3 Klasifikasi Feroresonansi .....	12
2.4 Transformasi <i>Wavelet</i> .....	14
2.4.1 <i>Mother Wavelet</i> .....	15
2.4.2 <i>Continuous Wavelet Transform (CWT)</i> .....	18
2.4.3 <i>Discrete Wavelet Transform (DWT)</i> .....	19
2.4.4 Aplikasi Transformasi <i>Wavelet</i> .....	19
<b>BAB III PEMODELAN, SIMULASI DAN PENDETEKSIAN</b>	
<b>FERORESONANSI .....</b>	<b>21</b>
3.1 Pemodelan Feroresonansi.....	21
3.2 Simulasi Pemodelan Feroresonansi.....	23
3.2.1 Pemilihan <i>Time Step</i> .....	24
3.2.2 Mode <i>Fundamental</i> .....	24
3.2.3 Mode <i>Subharmonic</i> .....	25

3.2.4	Mode <i>Quasi Periodic</i> .....	27
3.2.5	Mode <i>Chaotic</i> .....	28
3.3	Deteksi Feroresonansi Metode Koefisien Detail .....	29
3.3.1	Daftar <i>Mother Wavelet</i> .....	32
3.3.2	Proses Transformasi <i>Wavelet</i> .....	34
3.3.3	Proses Penentuan Nilai <i>Threshold</i> .....	35
3.3.4	Proses Deteksi .....	36
3.4	Deteksi Feroresonansi Metode Energi Kumulatif .....	36
<b>BAB IV</b>	<b>PEMILIHAN BASIS WAVELET UNTUK DETEKSI</b>	
	<b>FERORESONANSI</b> .....	<b>39</b>
4.1	Hasil Transformasi <i>Wavelet</i> .....	39
4.1.1	Mode <i>Fundamental</i> .....	39
4.1.2	Mode <i>Subharmonic</i> .....	41
4.1.3	Mode <i>Quasi-Periodic</i> .....	43
4.1.4	Mode <i>Chaotic</i> .....	45
4.2	Penentuan Nilai <i>Threshold</i> .....	47
4.3	Deteksi Feroresonansi Metode Koefisien Detail .....	49
4.3.1	Mode <i>Fundamental</i> .....	50
4.3.2	Mode <i>Subharmonic</i> .....	52
4.3.3	Mode <i>Quasi-Periodic</i> .....	55
4.3.4	Mode <i>Chaotic</i> .....	58
4.4	Deteksi Feroresonansi Metode Energi Kumulatif .....	62
<b>BAB V</b>	<b>PENUTUP</b> .....	<b>71</b>
5.1	Kesimpulan .....	71
5.2	Saran .....	72
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>73</b>
	<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>77</b>
	<b>BIODATA PENULIS</b> .....	<b>79</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Diagram Garis Sistem Tenaga Listrik.....	5
<b>Gambar 2.2</b>	Tipe Trafo: (a) Tipe Inti , (b) Tipe Cangkang.....	8
<b>Gambar 2.3</b>	Rangkaian Ekvivalen Transformator [5] .....	9
<b>Gambar 2.4</b>	Kurva Magnetisasi Inti Trafo[5] .....	9
<b>Gambar 2.5</b>	Rangkaian Resonansi Seri .....	11
<b>Gambar 2.6</b>	Rangkaian Dasar Feroresonansi [6] .....	12
<b>Gambar 2.7</b>	Karakteristik Feroresonansi Mode <i>Fundamental</i> [6] ...	13
<b>Gambar 2.8</b>	Karakteristik Feroresonansi Mode <i>Subharmonic</i> [6] ...	13
<b>Gambar 2.9</b>	Karakteristik Feroresonansi Mode <i>Quasi-Periodic</i> [6].....	14
<b>Gambar 2.10</b>	Karakteristik Feroresonansi Mode <i>Chaotic</i> [6].....	14
<b>Gambar 2.11</b>	Contoh Gelombang <i>Mother Wavelet</i> [25].....	16
<b>Gambar 2.12</b>	Proses Dilasi dan Translasi <i>Mother Wavelet</i> [25] .....	17
<b>Gambar 2.13</b>	<i>Daubechies Mother Wavelet</i> : (a)db2,(b) db3, (c) db4,(d) db5,(e) db6 dan (f) db10. [26].....	17
<b>Gambar 2.14</b>	Aplikasi Transformasi <i>Wavelet</i> pada Sistem Tenaga Listrik[24].....	20
<b>Gambar 3.1</b>	Pemodelan Feroresonansi Trafo Satu Fasa .....	21
<b>Gambar 3.2</b>	Pemodelan Feroresonansi Trafo Tiga Fasa .....	22
<b>Gambar 3.3</b>	Kurva Karakteristik Magnetisasi Inti Transformator..	23
<b>Gambar 3.4</b>	Plot Simulasi dengan variasi <i>time step</i> .....	24
<b>Gambar 3.5</b>	Sinyal Tegangan Feroresonansi Mode <i>Fundamental</i> ...	25
<b>Gambar 3.6</b>	Spektrum Tegangan Feroresonansi Mode <i>Fundamental</i> .....	25
<b>Gambar 3.7</b>	Sinyal Tegangan Feroresonansi Mode <i>Subharmonic</i> ...	26
<b>Gambar 3.8</b>	Spektrum Tegangan Feroresonansi Mode <i>Subharmonic</i> .....	26
<b>Gambar 3.9</b>	Sinyal Tegangan Feroresonansi Mode <i>Quasi-Periodic</i>	27
<b>Gambar 3.10</b>	Spektrum Tegangan Feroresonansi Mode <i>Quasi-Periodic</i> .....	27
<b>Gambar 3.11</b>	Sinyal Tegangan Feroresonansi Mode <i>Chaotic</i> .....	28
<b>Gambar 3.12</b>	Spektrum Tegangan Feroresonansi Mode <i>Chotic</i> .....	28
<b>Gambar 3.13</b>	Sinyal Sampel Deteksi Transient pada Feroresonansi .	29

<b>Gambar 3.14</b>	Sinyal <i>Details Coefficient</i> Transformasi <i>Wavelet Db 5</i> .....	30
<b>Gambar 3.15</b>	Sinyal <i>Details Coefficient</i> Transformasi <i>Wavelet</i> <i>Dmey</i> .....	30
<b>Gambar 3.16</b>	Diagram Alur Proses Pengambilan Data .....	31
<b>Gambar 3.17</b>	Diagram Alur Proses Transformasi <i>Wavelet</i> .....	34
<b>Gambar 3.18</b>	Diagram Alur Proses Penentuan <i>Threshold</i> .....	35
<b>Gambar 3.19</b>	Diagram Alur Proses Deteksi .....	36
<b>Gambar 3.20</b>	Proses Deteksi Kumulatif Energi .....	37
<b>Gambar 4.1</b>	Sinyal Masukan Feroresonansi Mode <i>Fundamental</i> ....	39
<b>Gambar 4.2</b>	Hasil Transformasi <i>Wavelet</i> Mode <i>Fundamental</i> .....	41
<b>Gambar 4.3</b>	Sinyal Masukan Feroresonansi Mode <i>Subharmonic</i> ....	41
<b>Gambar 4.4</b>	Hasil Transformasi <i>Wavelet</i> Mode <i>Subharmonic</i> .....	43
<b>Gambar 4.5</b>	Sinyal Masukan Feroresonansi Mode <i>Quasi-Periodic</i> .....	43
<b>Gambar 4.6</b>	Hasil Transformasi <i>Wavelet</i> Mode <i>Quasi-Periodic</i> .....	45
<b>Gambar 4.7</b>	Sinyal Masukan Feroresonansi Mode <i>Chaotic</i> .....	45
<b>Gambar 4.8</b>	Hasil Transformasi <i>Wavelet</i> Mode <i>Chaotic</i> .....	47
<b>Gambar 4.9</b>	Koefisien Detail pada Kondisi Normal .....	48
<b>Gambar 4.10</b>	Perbandingan Hasil Deteksi Feroresonansi Mode <i>Fundamental</i> dengan Berbagai <i>Mother Wavelet</i> .....	50
<b>Gambar 4.11</b>	Perbandingan Hasil Deteksi Feroresonansi Mode <i>Subharmonic</i> dengan Berbagai <i>Mother Wavelet</i> .....	53
<b>Gambar 4.12</b>	Deteksi Feroresonansi Mode <i>Quasi-Periodic Mother Wavelet Dmey</i> .....	55
<b>Gambar 4.13</b>	Perbandingan Hasil Deteksi Feroresonansi Mode <i>Quasi-Periodic</i> dengan Berbagai <i>Mother Wavelet</i> .....	56
<b>Gambar 4.14</b>	Perbandingan Hasil Deteksi Feroresonansi Mode <i>Chaotic</i> dengan Berbagai <i>Mother Wavelet</i> .....	58

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	<i>Mother Wavelet Family</i> dan Keterangannya .....	16
<b>Tabel 3.1</b>	Spesifikasi Transformator tipe M5 .....	22
<b>Tabel 3.2</b>	Karakteristik Magnetisasi Inti Transformator tipe M5 .....	23
<b>Tabel 3.3</b>	Parameter Rangkaian pada Mode <i>Fundamental</i> .....	24
<b>Tabel 3.4</b>	Parameter Rangkaian pada Mode <i>Subharmonic</i> .....	26
<b>Tabel 3.5</b>	Parameter Rangkaian pada Mode <i>Quasi Periodic</i> .....	27
<b>Tabel 3.6</b>	Parameter Rangkaian pada Mode <i>Chaotic</i> .....	28
<b>Tabel 3.7</b>	DWT <i>Mother Wavelet</i> pada MATLAB .....	32
<b>Tabel 4.1</b>	Nilai Maksimum Koefisien Detail pada Kondisi Normal ..	48
<b>Tabel 4.2</b>	Tabel Hasil Deteksi Feroresonansi Mode <i>Fundamental</i> ...	51
<b>Tabel 4.3</b>	Hasil Deteksi Feroresonansi Mode <i>Subharmonic</i> .....	53
<b>Tabel 4.4</b>	Hasil Deteksi Feroresonansi Mode <i>Quasi-Periodic</i> .....	56
<b>Tabel 4.5</b>	Hasil Deteksi Feroresonansi Mode <i>Chaotic</i> .....	59
<b>Tabel 4.6</b>	<i>Rank Mother Wavelet</i> Berdasarkan Kecepatan Deteksi Feroresonansi .....	61
<b>Tabel 4.7</b>	Energi Kumulatif Mode <i>Fundamental</i> .....	63
<b>Tabel 4.8</b>	Energi Kumulatif Mode <i>Subharmonic</i> .....	65
<b>Tabel 4.9</b>	Energi Kumulatif Mode <i>Quasi-Periodic</i> .....	66
<b>Tabel 4.10</b>	Energi Kumulatif Mode <i>Chaotic</i> .....	68

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Listrik sudah menjadi kebutuhan primer yang tidak bisa dipisahkan dari kehidupan sehari-hari. Hampir di semua aktivitas manusia saat ini menggunakan peralatan yang menggunakan energi listrik sebagai sumber energi utamanya. Energi listrik untuk bisa sampai ke pengguna melalui proses yang cukup panjang, dimulai dari proses sistem pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi hingga sistem distribusi tenaga listrik yang akhirnya listrik dapat digunakan langsung oleh pengguna listrik. Seluruh proses tersebut menggunakan berbagai peralatan listrik yang memiliki tugas dan fungsi tertentu. Seluruh peralatan tersebut bertanggung jawab menjamin kualitas dan keandalan sistem tenaga listrik. Salah satu peralatan yang memiliki peranan penting dalam sistem tenaga listrik adalah transformator. Transformator merupakan peralatan listrik yang bertugas menaikkan dan menurunkan nilai tegangan listrik sesuai dengan kebutuhan. Transformator memiliki peranan penting dalam sistem transmisi dan sistem distribusi. Oleh karena itu, kinerja transformator saat mempengaruhi kualitas dan keandalan sistem tenaga listrik.

Satu dari sekian banyak masalah serius dalam sistem tenaga listrik adalah adanya tegangan dan arus lebih yang diakibatkan oleh fenomena feroresonansi. Gangguan ini dapat menyebabkan berkurangnya umur bahkan kerusakan pada suatu peralatan listrik seperti transformator, kabel dll. Feroresonansi merupakan suatu fenomena resonansi non-linear hasil interaksi antara komponen kapasitansi dan induktansi inti besi yang biasanya dipicu oleh gangguan transien lain seperti *short circuit* dan *switching*. Fenomena ini mengakibatkan kenaikan tegangan dan arus yang tidak biasa dan dapat merusak peralatan listrik yang selanjutnya dapat mengganggu sistem kelistrikan [6-9]. Feroresonansi biasanya terjadi pada sistem tegangan tinggi yang memiliki rugi-rugi yang kecil [6]. Salah satu permasalahan utama dalam fenomena ini adalah kompleksnya fenomena ini dalam hal pendeteksian. Hal inilah yang menyebabkan fenomena ini masih belum bisa diatasi secara efektif hingga sampai saat ini [8].

Transformasi *wavelet* merupakan suatu metode analisa matematis yang dikembangkan dari transformasi *fourier*. Transformasi *wavelet* biasanya digunakan dalam *image compression*, *acoustic* dll.

Namun beberapa tahun ini, transformasi ini juga sudah mulai digunakan sebagai metode untuk mengidentifikasi dan menganalisis dalam sistem tenaga listrik salah satunya adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis fenomena feroresonansi [8-11]. Namun dalam penggunaannya ada banyak jenis dan basis *wavelet* itu sendiri, memilih basis/*mother wavelet* yang tepat digunakan untuk menganalisis dan mengidentifikasi sinyal merupakan hal yang sangat krusial mengingat setiap basis/*mother wavelet* memiliki karakteristik masing-masing.

Pada studi ini akan dilakukan simulasi pemodelan feroresonansi pada transformator mengacu pada penelitian yang sudah pernah dilakukan sebelumnya. Simulasi dilakukan untuk mendapatkan sinyal feroresonansi yang akan dijadikan sampel dalam studi ini. Sinyal feroresonansi yang didapatkan dari simulasi kemudian akan dianalisis menggunakan transformasi diskrit *wavelet* dengan menggunakan berbagai basis/*mother wavelet* yang berbeda.

Masalah yang dibahas pada studi ini adalah bagaimana proses pemilihan basis/*mother wavelet* yang tepat digunakan untuk pendeteksian fenomena feroresonansi dan menentukan basis/*mother wavelet* yang tepat serta efektif untuk digunakan pada pendeteksian fenomena feroresonansi. Batasan masalah pada studi ini adalah rangkaian simulasi pembangkit feroresonansi menggunakan data transformator 70/6 kV 6MVA PT. Bambang Djaja tipe inti M5 dan simulasi dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak ATPDraw. Batasan masalah lainnya adalah transformasi *wavelet* dilakukan menggunakan transformasi *wavelet* diskrit dengan menggunakan 54 basis/*mother wavelet* yang diolah dan dianalisa menggunakan bantuan perangkat lunak MATLAB.

Tujuan dari hasil studi ini diharapkan dapat diketahui basis/*mother wavelet* yang paling tepat dan efektif dalam pendeteksian fenomena feroresonansi. Hasil dari studi ini juga diharapkan dapat menjadi referensi untuk penelitian pendeteksian feroresonansi menggunakan transformasi *wavelet* dimasa yang akan datang sehingga permasalahan feroresonansi pada peralatan sistem tenaga listrik khususnya pada transformator dapat dideteksi dan ditangani dengan tepat serta efektif sehingga dapat meningkatkan kualitas dan keandalan sistem tenaga listrik.

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini dimulai dari studi pustaka, yaitu pengumpulan referensi yang dilakukan untuk mencari definisi, pengertian, dan semua tulisan yang berhubungan dengan tugas akhir ini. Beberapa kata kunci yang bisa



disebutkan untuk studi literatur ini seperti feroresonansi, transformasi *wavelet*, pemodelan sinyal data, dsb. Dari literatur-literatur yang didapat ini, nantinya diadopsi sebagian isinya sebagai pendukung dalam pengerjaan tugas akhir ini. Kemudian dilanjutkan dengan persiapan segala hal yang dibutuhkan untuk simulasi dan pengambilan data. Hal yang harus dipersiapkan adalah data dan referensi yang diperlukan dalam pemodelan dan klasifikasi sinyal feroresonansi. Data dan referensi ini nantinya akan digunakan untuk simulasi rangkaian pembangkit feroresonansi. Untuk pemodelan rangkaian, menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Setelah pemodelan pembangkit feroresonansi diketahui, selanjutnya dilakukan simulasi dan pengambilan data sinyal feroresonansi menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Setelah data sinyal sampel didapatkan selanjutnya dilakukan pengolahan dan analisa data yang bertujuan untuk mengolah data sinyal feroresonansi yang didapat dari simulasi ke dalam bentuk transformasi *wavelet* yang selanjutnya dianalisis guna mengetahui basis *wavelet* yang paling tepat dan efektif untuk pendeteksian fenomena feroresonansi. Pengolahan data sinyal dan transformasi *wavelet* dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB. Tahap terakhir dilakukan dengan penarikan kesimpulan dan penyusunan laporan tugas akhir berdasarkan studi yang telah dilakukan.

## **1.2 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.

Bab 2 : Feroresonansi dalam Sistem Tenaga Listrik

Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini.

Bab 3 : Pemodelan, Simulasi dan Pendeteksian Feroresonansi

Bab ini membahas mengenai metode pemodelan rangkaian pembangkit feroresonansi yang akan digunakan untuk simulasi dan metode deteksi feroresonansi.

- Bab 4 : Pemilihan Basis Wavelet untuk Deteksi Feroresonansi  
Bab ini membahas hasil analisis berdasarkan pengolahan data sinyal feroresonansi yang didapatkan dari simulasi ke dalam bentuk transformasi *wavelet* .
- Bab 5 : Penutup  
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

### 1.3 Relevansi

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Menjadi referensi dalam penelitian fenomena feroresonansi.
2. Menjadi referensi bagi penelitian yang menggunakan metode *transformasi wavelet* dalam pemrosesan dan analisis sinyal.
3. Menjadi referensi untuk menentukan basis/*mother wavelet* yang digunakan untuk analisis sinyal menggunakan transformasi *wavelet*.



### 2.1.1 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Energi listrik dibangkitkan oleh generator yang terdapat pada unit pembangkit/pusat pembangkit seperti PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap), PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air), PLTG (Pembangkit Listrik Tenaga Gas), dan lain-lain. Pusat pembangkit umumnya berada jauh dari pusat-pusat beban, yaitu dimana energi listrik digunakan dan dimanfaatkan oleh konsumen [2]. Oleh karena itu energi listrik yang telah dibangkitkan untuk bisa sampai menuju konsumen, harus disalurkan melalui suatu saluran transmisi. Penyaluran energi listrik dari pusat pembangkit menuju sistem distribusi dan konsumen disebut sebagai sistem transmisi tenaga listrik.

Tujuan utama sistem transmisi adalah menyalurkan daya listrik dengan tingkat efisiensi tinggi yaitu dengan rugi-rugi daya dan penurunan tegangan yang kecil. Rugi-rugi daya dalam sistem transmisi AC tiga fasa dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta P = 3I^2 R \quad (2.1)$$

Dengan  $\Delta P$  adalah rugi-rugi daya transmisi AC tiga fasa (watt),  $I$  adalah arus yang mengalir pada kawat transmisi (ampere) dan  $R$  adalah resistansi kawat transmisi tiap fasa (ohm). Sedangkan arus pada kawat transmisi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} V_{LL} \cos \varphi} \quad (2.2)$$

Dengan  $P$  adalah daya yang ditransmisikan (watt),  $V_{LL}$  adalah tegangan fasa ke fasa (volt) dan  $\cos \varphi$  sama dengan faktor daya. Jika persamaan 2.1 dan persamaan 2.2 disubstitusikan maka akan menghasilkan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta P = \frac{P^2 R}{V_{LL}^2 \cos^2 \varphi} \quad (2.3)$$

Saat terbangkitkan energi listrik yang dihasilkan oleh pusat pembangkit umumnya memiliki level tegangan yang disesuaikan dengan spesifikasi generator yang digunakan, berkisar antara 6 kV hingga 24 kV dan memiliki nilai arus yang sangat besar. Untuk menyalurkan daya listrik dengan efisiensi yang tinggi, berdasarkan persamaan rugi-rugi daya (Persamaan 2.1 dan 2.3) maka tegangan pada energi listrik yang dihasilkan oleh pembangkit harus dinaikkan hingga level tertentu agar nilai arus menjadi lebih kecil (Persamaan 2.2). Tegangan yang digunakan pada sistem transmisi umumnya berkisar antara 70 kV hingga 500 kV.

### 2.1.2 Gardu Induk

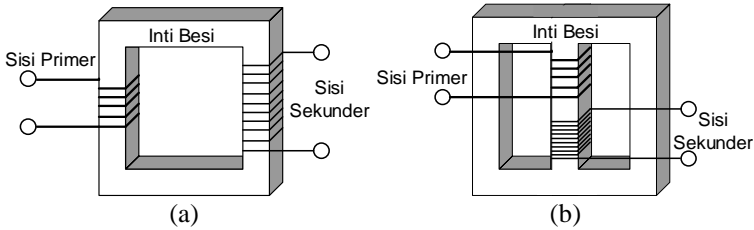
Untuk menyalurkan daya listrik yang efisien pada sistem transmisi, tegangan pada sisi pembangkit harus dinaikkan, umumnya menjadi 70 kV hingga 500 kV. Hal ini membutuhkan peralatan listrik yang dapat menaikkan level tegangan yaitu transformator *step up*. Semua peralatan/perlengkapan yang berada pada sisi sekunder transformator tersebut harus bisa memikul tegangan tinggi. Sedangkan pada sisi distribusi dan konsumen membutuhkan tegangan yang lebih rendah umumnya antara 220 V hingga 20 kV. Untuk itu tegangan dari sistem transmisi harus diturunkan menjadi level tegangan pada sistem distribusi. Hal ini membutuhkan peralatan listrik yang dapat menurunkan level tegangan yaitu transformator *step down*. Semua peralatan/perlengkapan yang berada pada sisi primer transformator ini juga harus bisa memikul tegangan tinggi. Transformator beserta peralatan pendukung lainnya ini disebut dengan gardu induk[4]. Selain berfungsi mentransformasikan daya listrik dari suatu level tegangan ke level tegangan lainnya, gardu induk juga berfungsi untuk melakukan pengukuran, pengawasan operasi serta pengamanan dari sistem tenaga listrik, sebagai pengaturan pelayanan beban dan juga dapat berfungsi sebagai sarana telekomunikasi yang dikenal dengan istilah SCADA.

Berikut ini adalah peralatan tegangan tinggi yang umumnya terdapat pada suatu gardu induk [4] :

- |                             |                            |
|-----------------------------|----------------------------|
| a. Transformator Daya       | g. Sakelar Pembumian       |
| b. Transformator Tegangan   | h. Sakelar Pemisah         |
| c. Transformator Arus       | i. Filter Frekuensi Tinggi |
| d. Pembagi Tegangan         | j. Konduktor               |
| Kapasitor                   | k. Isolator                |
| e. Pemutus Daya             |                            |
| f. Pelindung Tegangan Lebih |                            |

## 2.2 Transformator

Salah satu peralatan utama yang terdapat pada gardu induk adalah transformator. Transformator atau yang biasa disebut trafo adalah peralatan listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian lainnya melalui sebuah gandengan magnet berdasarkan prinsip elektromagnetik [2]. Secara umum trafo digunakan pada sistem tenaga listrik untuk menaikkan dan menurunkan nilai tegangan. Transformator terdiri dari tiga bagian utama yaitu kumparan primer, kumparan sekunder dan inti besi.



**Gambar 2.2** Tipe Trafo: (a) Tipe Inti , (b) Tipe Cangkang

Berdasarkan cara melilit kumparan pada inti besi trafo dibagi menjadi dua tipe yaitu tipe inti dan tipe cangkang. Sedangkan berdasarkan pemakaiannya pada sistem tenaga listrik transformator dapat dibagi menjadi :

1. Transformator Daya
2. Transformator Distribusi
3. Transformator Pengukuran

Trafo bekerja berdasarkan prinsip induktansi bersama atau *mutual induction* antara dua buah rangkaian yang terhubung oleh fluks magnetik. Pada Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa kumparan primer dan kumparan sekunder terhubung melalui sebuah inti besi. Saat kumparan pada sisi primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik (AC) maka akan timbul fluks bolak balik pada inti besi yang menyebabkan terjadinya gaya gerak listrik (GGL) induksi elektromagnetik pada kumparan sekunder sesuai dengan hukum faraday [2]

Pada sebuah trafo ideal yaitu saat seluruh muatan fluks yang terbangkitkan pada sisi primer saat diberi tegangan bolak balik akan diterima seutuhnya oleh kumparan sekunder tanpa adanya fluks bocor (*leakage flux*) maupun rugi-rugi lainnya berlaku persamaan tegangan pada sisi primer dan sekunder sebagai berikut :

$$E = 4.44 \cdot \phi_m \cdot N \cdot f \quad (2.4)$$

Dengan  $E$  adalah tegangan pada sisi kumparan primer dan sekunder (volt),  $\phi_m$  adalah fluks puncak ,  $N$  adalah jumlah lilitan dan  $f$  adalah frekuensi (hertz). Pada trafo ideal, hubungan tegangan, jumlah belitan dan arus dapat juga ditulis sebagai berikut :

$$P_p = P_s \quad (2.5)$$

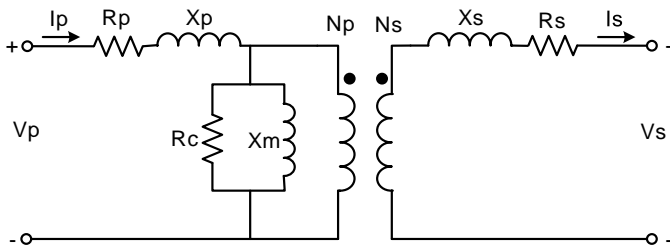
$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.6)$$

### 2.2.1 Rangkaian Ekuivalen Transformator

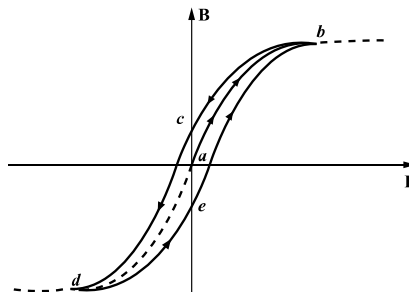
Pada kenyataannya, fluks yang dihasilkan oleh kumparan primer saat diberi tegangan bolak balik tidak sepenuhnya berada pada inti besi dan tersalurkan ke kumparan sekunder sepenuhnya. Hal ini dikarenakan terjadi fluks bocor pada kumparan primer dan kumparan sekunder. Fluks bocor ini digambarkan oleh induktansi  $X_p$  dan  $X_s$ . Pada trafo juga terdapat rugi-rugi seperti rugi-rugi kumparan/belitan yang digambarkan dengan resistansi  $R_p$  dan  $R_s$ . Inti trafo dimodelkan dengan efek eksitasi inti trafo berupa reaktansi  $X_m$  dan rugi-rugi inti trafo yang digambarkan dengan resistansi  $R_c$ . Keseluruhan rangkaian ekuivalen trafo dapat gambarkan pada Gambar 2.3.

### 2.2.2 Kurva Magnetisasi Inti Transformator

Penggunaan bahan pada inti trafo berpengaruh terhadap kinerja dan rugi-rugi suatu trafo. Kurva magnetisasi inti trafo atau bisa juga disebut kurva saturasi adalah kurva yang menunjukkan karakteristik pada suatu inti trafo dengan menggambarkan hubungan antara kerapatan medan magnetik ( $B$ ) dan Intensitas medan magnetik ( $H$ ). Kurva magnetisasi inti trafo dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.3** Rangkaian Ekuivalen Transformator [5]



**Gambar 2.4** Kurva Magnetisasi Inti Trafo[5]

Pada saat awal trafo diberikan tegangan dan arus, kurva bergerak dari titik  $a$  ke titik  $b$  pada fase ini kerapatan fluks akan meningkat hingga mencapai titik saturasinya. Saat nilai arus menurun, nilai fluks tidak turun kembali ke titik  $a$  tetapi turun melalui titik  $c$  dan turun lagi menuju titik  $d$ . Hal ini disebabkan oleh adanya fluks sisa pada saat titik  $c$ . Ketika nilai arus naik kembali dari titik  $d$  menuju titik  $e$  lalu naik kembali ke titik  $b$ . Ketika intensitas medan magnet ( $H$ ) mencapai titik nol, kerapatan fluks ( $B$ ) tidak mencapai titik nol hal ini dikarenakan terdapat fluks sisa pada inti trafo. Fluks sisa tersebut dipengaruhi oleh permeabilitas bahan pada inti trafo. Bahan inti yang kurang baik ditandai dengan kurva magnetisasi yang lebih lebar sedangkan bahan inti yang baik ditandai dengan kurva yang lebih linear dan kurus.

## 2.3 Fenomena Feroresonansi

Salah satu permasalahan dalam sistem tenaga listrik yang mengganggu kinerja bahkan dapat merusak peralatan listrik seperti trafo adalah adanya fenomena feroresonansi. Sebelum membahas tentang feroresonansi lebih dalam ada baiknya kita mengetahui apa itu resonansi terlebih dahulu.

### 2.3.1 Resonansi

Sistem tenaga listrik bolak balik (AC) biasanya memiliki komponen resistif, induktif dan kapasitif yang masing-masing dimodelkan dengan resistor ( $R$ ), induktor ( $L$ ) dan kapasitor ( $C$ ). Ketiga komponen tersebut biasanya disebut sebagai impedansi ( $Z$ ). Resonansi terbagi menjadi dua yaitu resonansi seri dan resonansi paralel. Resonansi seri terjadi saat komponen induktif dan kapasitif terhubung secara seri yang dapat dilihat pada Gambar 2.5. Pada rangkaian resonansi seri, nilai impedansi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (2.7)$$

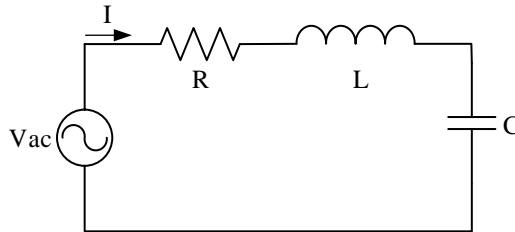
Dengan  $Z$  adalah impedansi (ohm),  $X_L$  adalah reaktansi induktif dan  $X_C$  adalah reaktansi kapasitif. Nilai reaktansi induktif dan kapasitif dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (2.8)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.9)$$

Dengan  $f$  adalah frekuensi (hertz),  $L$  adalah induktansi (henry) dan  $C$  adalah kapasitansi (farad).





**Gambar 2.5** Rangkaian Resonansi Seri

Hubungan tegangan, arus dan impedansi pada rangkaian diatas dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$V = I Z \quad (2.10)$$

Dengan  $V$  adalah tegangan (volt),  $I$  adalah arus (ampere) dan  $Z$  adalah impedansi (ohm).

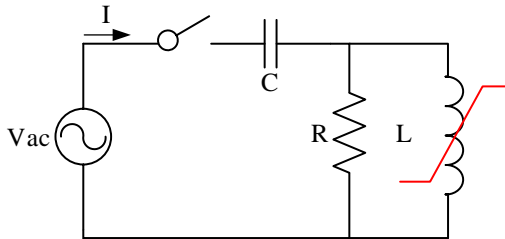
Pada frekuensi tertentu, saat nilai reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif ( $X_L = X_C$ ) nilai reaktansi menjadi nol. Hal ini menyebabkan nilai impedansi menjadi minimum dan menjadi murni resistif ( $Z = R$ ). Dengan minimumnya nilai impedansi pada saat terjadi resonansi seri, maka berdasarkan hubungan tegangan arus dan impedansi pada persamaan 2.10, dengan nilai tegangan tetap mengakibatkan nilai arus yang mengalir menjadi maksimum. Fenomena inilah yang dinamakan dengan resonansi seri. Berdasarkan persamaan 2.8 dan persamaan 2.9 maka syarat terjadinya resonansi seri dapat ditulis sebagai berikut :

$$LC(2\pi f)^2 = 1 \quad (2.11)$$

Pada resonansi paralel, komponen resistif, induktif dan kapasitif terhubung secara paralel. Pada saat resonansi terjadi, mengakibatkan nilai impedansi menjadi maksimum sedangkan nilai arus menjadi minimum.

### 2.3.2 Feroresonansi

Feroresonansi merupakan suatu fenomena resonansi non-linear hasil interaksi antara kapasitor dan induktor inti besi non-linear. Feroresonansi biasanya dipicu oleh gangguan transien lain seperti *short circuit* dan *switching* yang dapat menyebabkan kenaikan tegangan dan arus yang tidak biasa [6-9]. Istilah feroresonansi pertama kali dikenalkan di sebuah tulisan pada tahun 1920 yang merujuk pada segala bentuk



**Gambar 2.6** Rangkaian Dasar Feroresonansi [6]

fenomena osilasi yang terjadi pada rangkaian listrik yang setidaknya mengandung [6]:

- a. Induktansi non-linear
- b. Kapasitansi
- c. Sumber tegangan bolak balik (AC) (umumnya sinusoidal)
- d. Memiliki rugi-rugi yang kecil.

Hal-hal diatas dapat kita temui saat ini di sistem transmisi dan sistem distribusi tenaga listrik seperti induktansi non-linear yang dapat ditemui pada inti trafo, reaktor dan lain-lain. Sedangkan kapasitansi dapat kita temui pada kapasitor bank, kabel transmisi saluran panjang, CVT (*capacitive voltage transformer*) dan lain-lain. Faktor-faktor inilah yang akan berkontribusi menyebabkan fenomena feroresonansi [6].

Perbedaan mendasar antara resonansi linear dan resonansi non linear atau feroresonansi terletak pada komponen induktansi dan kapasitansinya. Feroresonansi terjadi akibat adanya komponen induktansi non linear dan memiliki rentang nilai kapasitansi yang luas, sedangkan pada resonansi diakibatkan oleh suatu frekuensi tertentu dan dengan nilai induktansi dan kapasitansi tertentu. Pada Gambar 2.6 dapat dilihat rangkaian dasar feroresonansi.

### 2.3.3 Klasifikasi Feroresonansi

Berdasarkan penelitian pada feroresonansi dengan berbagai macam simulasi, feroresonansi dapat diklasifikasikan menjadi empat mode berbeda. Empat mode ini dapat diklasifikasikan berdasarkan kondisi feroresonansi *steady state*, hal ini dikarenakan sulit membedakan sinyal feroresonansi pada saat kondisi transien [6]. Feroresonansi dapat diidentifikasi modenya dengan menganalisa spektrum tegangan dan arus atau menggunakan gambar stroboskopik yang diperoleh dengan mengukur arus dan tegangan pada suatu titik tertentu dari sinyal dan

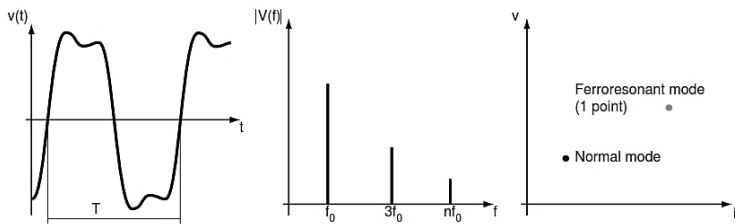
memplot nilai tegangan terhadap arus yang dipisahkan pada periode sistem yang digunakan [6]. Berikut ini adalah karakteristik dari empat mode ferroresonansi yaitu mode *fundamental*, mode *subharmonic*, mode *quasi-periodic* dan mode *chaotic* :

### 1. Mode Fundamental

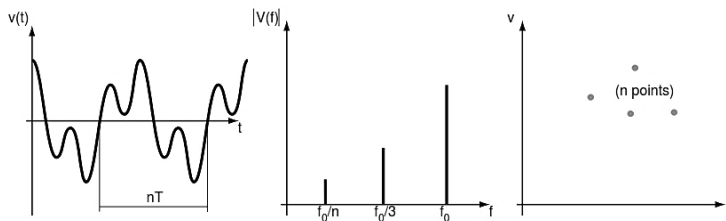
Karakteristik mode *fundamental* dapat dilihat pada Gambar 2.7. pada ferroresonansi mode ini sinyal ferroresonansi memiliki periode yang sama seperti periode sistem dengan memiliki spektrum sinyal diskontinyu yang terdiri dari frekuensi sistem ( $f_0$ ) dan frekuensi harmonisnya ( $2f_0, 3f_0 \dots$ ). Pada gambar stroboskopik terdapat satu titik ferroresonansi yang berada cukup jauh dari keadaan normal.

### 2. Mode Subharmonic

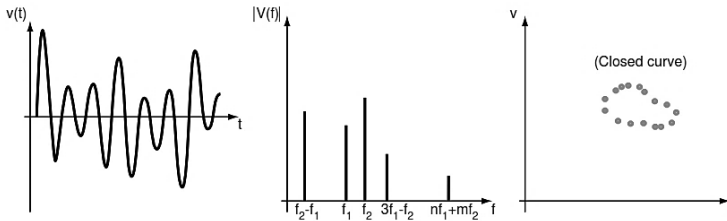
Karakteristik mode *subharmonic* dapat dilihat pada Gambar 2.8. Pada mode ini, sinyal ferroresonansi ditandai dengan sinyal memiliki periode kelipatan  $n$  kali dari periode sistem. Pada spektrum sinyal menunjukan frekuensi sistem ( $f_0$ ) dan frekuensi  $f_0/n$  dimana  $n$  adalah bilangan integer. Gambar stroboskopik terdapat sebanyak  $n$  titik.



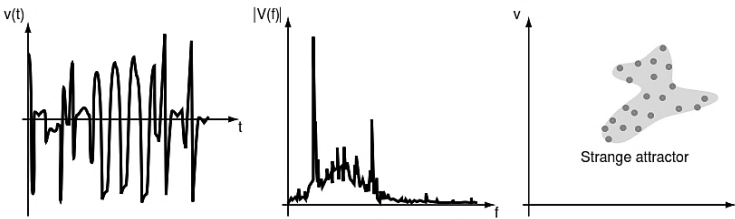
**Gambar 2.7** Karakteristik Ferroresonansi Mode *Fundamental* [6]



**Gambar 2.8** Karakteristik Ferroresonansi Mode *Subharmonic* [6]



**Gambar 2.9** Karakteristik Feroresonansi Mode *Quasi-Periodic* [6]



**Gambar 2.10** Karakteristik Feroresonansi Mode *Chaotic* [6]

### 3. Mode *Quasi-Periodic*

Karakteristik mode *quasi-periodic* dapat dilihat pada Gambar 2.9. Mode feroresonansi ini tidak periodik, memiliki spektrum frekuensi diskontinyu dengan frekuensi  $nf_1 + mf_2$  dengan nilai  $n$  dan  $m$  berupa bilangan integer dan  $f_1/f_2$  berupa bilangan irrasional. Gambar stroboskopik berupa titik-titik yang membentuk kurva tertutup seperti terlihat pada gambar.

### 4. Mode *Chaotic*

Karakteristik mode *chotic* dapat dilihat pada Gambar 2.10. Sinyal feroresonansi pada mode ini memiliki bentuk yang tidak beraturan dan tidak periodik. Memiliki spektrum sinyal yang kontinyu dan tidak beraturan. Gambar stroboskopik menunjukkan titik-titik membentuk suatu area tidak teratur yang dinamakan *strange attractor*.

## 2.4 Transformasi *Wavelet*

Konsep “*ondelettes*” atau yang biasa disebut “*wavelet*” merupakan bentuk lain dari *time-frequency analysis* yang mulai dikembangkan pada tahun 1980an dan menjadi *tool* yang ampuh digunakan untuk analisa dan pengolahan sinyal [12]. Pada suatu analisa sinyal, Transformasi *fourier* hanya bisa memberi tahu informasi

mengenai frekuensi(osilasi yang terdiri dari sinyal) tetapi tidak bisa memberi informasi langsung kapan osilasi ini terjadi. Transformasi lain yang bisa digunakan untuk menganalisa domain waktu dan frekuensi secara bersamaan adalah bentuk *short-time fourier transform* (STFT) namun pendekatan ini memiliki kekurangan yaitu selang waktu yang sama tidak dapat diatur ketika durasi sangat singkat dan lonjakan frekuensi yang tinggi sulit dideteksi [12-16]. Lalu munculah transformasi *wavelet* yang dapat melacak informasi waktu dan frekuensi secara bersamaan, transformasi ini juga dapat melakukan “zoom in” pada lonjakan frekuensi singkat juga dapat melakukan “zoom out” untuk mendeteksi osilasi yang panjang dan lambat.

#### 2.4.1 *Mother Wavelet*

*Wavelet* mengacu pada kata “*short wave*” yang berarti gelombang pendek yang berasal dari kata perancis “*ondelettes*”. *Mother wavelet* yang pada literatur biasa disebut fungsi *wavelet* atau *wavelet* adalah basis fungsi dalam transformasi *wavelet* [14]. *Mother wavelet* adalah sebuah fungsi gelombang osilasi yang dimulai dari nol , berosilasi naik turun dan kembali ke nol. Fungsi ini dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\int \psi(t) dt = 0 \quad (2.12)$$

Dengan  $\psi(t)$  adalah *mother wavelet* .

Ada empat tipe *mother wavelet* yaitu *crude mother wavelet*, *orthogonal mother wavelet* , *biorthogonal mother wavelet* dan *reverse biorthogonal mother wavelet*. Tabel 2.1 menunjukkan berbagai macam *mother wavelet family* beserta keterangannya.

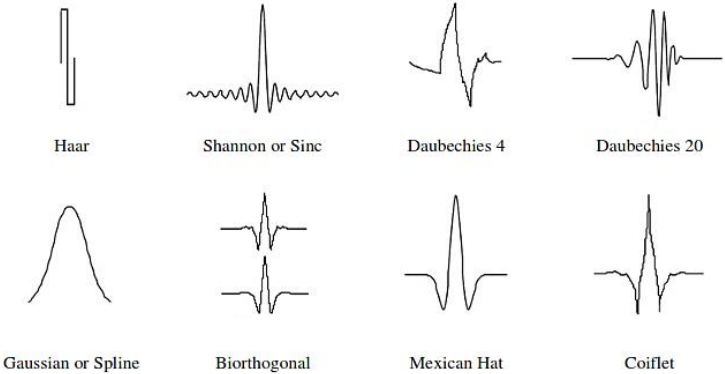
*Mother wavelet* tipe *crude* berasal dari sebuah persamaan matematika dan dapat direpresentasikan kedalam bentuk persamaan matematika. Contohnya *mexican hat wavelet*, dapat ditunjukkan oleh persamaan berikut :

$$mexh(t) = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{0.25} \right) e^{\frac{-t^2}{2}} (1-t^2) \quad (2.13)$$

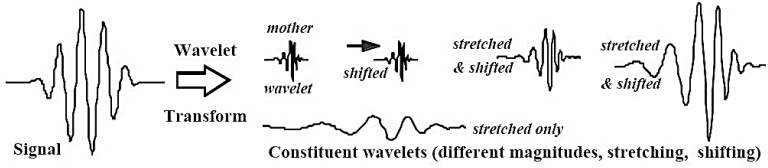
**Tabel 2.1** *Mother Wavelet Family* dan Keterangannya

Wavelet Family	Tipe	Tipe Transformasi
Mexican Hat	Crude	CWT
Morlet	Crude	CWT
Gaussian	Crude	CWT
Mayer	Crude	CWT
Shanon	Crude	CWT
Complex B-Spline	Crude	CWT
Complex Morlet	Crude	CWT
Complex Gaussian	Crude	CWT
Haar	Orthogonal	CWT dan DWT
Daubechies	Orthogonal	CWT dan DWT
Symlets	Orthogonal	CWT dan DWT
Coiflets	Orthogonal	CWT dan DWT
Discrete Mayer	Orthogonal	CWT dan DWT
Biorthogonal	Biorthogonal	CWT dan DWT
Reverse Biorthogonal	Reverse Biorthogonal	CWT dan DWT

*Mother wavelet* tipe *crude* yang kompleks memiliki kelebihan yaitu dapat digunakan untuk menganalisa sinyal yang kompleks. *Mother wavelet* tipe *orthogonal* adalah *mother wavelet* yang memiliki sifat ortogonalitas, contohnya adalah pada *daubechies mother wavelet*. Pada Gambar 2.11 dapat dilihat contoh bentuk dari berbagai macam *mother wavelet*.



**Gambar 2.11** Contoh Gelombang *Mother Wavelet* [25]



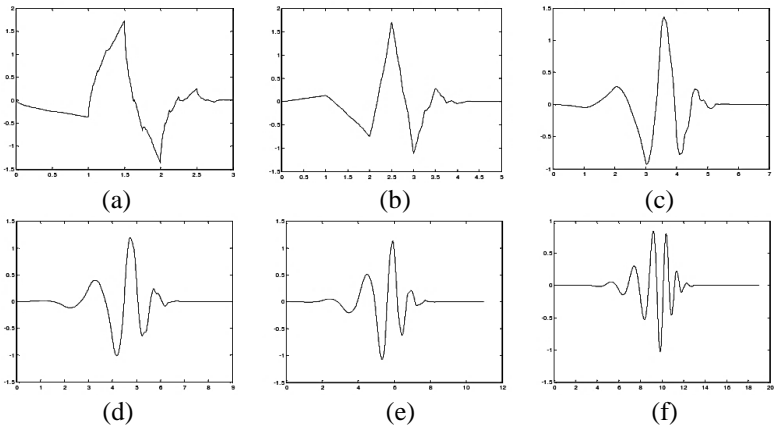
**Gambar 2.12** Proses Dilasi dan Translasi *Mother Wavelet* [25]

Pada transformasi *wavelet*, *mother wavelet* berperan sebagai sebagai basis fungsi seperti halnya fungsi sinus dan cosinus pada transformasi *fourier*. Pada transformasi *wavelet*, *mother wavelet* mengalami dilasi (pelebaran) dan tranlasi (pergeseran posisi) saat mentransformasikan suatu sinyal. Parameter dilasi dan parameter translasi dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.14)$$

Dengan  $a$  adalah parameter dilasi,  $b$  adalah parameter translasi dan  $1/\sqrt{a}$  adalah faktor normalisasi.

*Mother wavelet* mengalami kontraksi (penyempitan) pada frekuensi tinggi dan mengalami dilasi pada frekuensi rendah. Gambar 2.12 menunjukkan *mother wavelet* saat mengalami dilasi saat proses transformasi *wavelet*.



**Gambar 2.13** *Daubechies Mother Wavelet* : (a)db2,(b) db3,(c) db4,(d) db5,(e) db6 dan (f) db10. [26]

Pada Tabel 2.1 dapat diketahui bahwa terdapat dua jenis transformasi *wavelet* yaitu *Continuous Wavelet Transform* (CWT) dan *Discrete Wavelet Transform* (DWT). *Mother wavelet* yang bertipe *crude* hanya dapat digunakan pada CWT sedangkan tipe lain yang memiliki sifat ortogonalitas dapat digunakan pada CWT dan DWT. DWT memiliki kesamaan dengan MRA (*Multi Resolution Analysis*) yang mana menggunakan empat filter dalam analisisnya. Dua filter digunakan saat dekomposisi yaitu *High Pass* (*H*) dan *Low Pass* (*L*) dan menggunakan dua filter saat rekonstruksi yaitu *High Pass* (*H'*) dan *Low Pass* (*L'*). Filter *high pass* *H* dan *H'* bisa filter yang sama atau berbeda, tergantung penggunaannya. Begitu pula dengan filter *low pass*. Filter *low pass* *L* ortogonal atau tegak lurus terhadap filter *high pass*. Pembahasan lebih dalam tentang CWT dan DWT akan dibahas pada subab berikutnya.

Setiap *mother wavelet family* biasanya memiliki beberapa anggota. Contohnya pada *daubechies mother wavelet family* yang memiliki anggota berdasarkan jumlah titik filter yang digunakan. Contohnya *db4* yang menggunakan 4 titik filter dan *db6* yang menggunakan 6 titik filter. Gambar 2.13 menunjukkan bentuk berbagai anggota *daubechies mother wavelet*. Beberapa penulis biasanya mendeskripsikan anggota *mother wavelet* berdasarkan jumlah *vanishing moment* dari pada berdasarkan jumlah titik filter. Pembahasan mendalam mengenai *vanishing moment* dapat dibaca pada [25].

#### 2.4.2 Continuous Wavelet Transform (CWT)

*Continuous wavelet transform* atau transformasi *wavelet* kontinyu dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$WT(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi(t) dt \quad (2.15)$$

Dengan  $WT(t)$  adalah sinyal hasil transformasi *wavelet*,  $x(t)$  adalah sinyal yang ditransformasikan dan  $\psi(t)$  sudah dibahas sebelumnya adalah fungsi *mother wavelet*.

Persamaan 2.15 diatas adalah bentuk persamaan yang paling sederhana dari transformasi *wavelet*. Dikarenakan *mother wavelet* pada saat transformasi mengalami translasi (pergeseran) dan dilatasi (pelebaran) maka, persamaan 2.14 dapat disubstitusi ke dalam persamaan 2.15 menjadi:

$$WT_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.16)$$



Berdasarkan persamaan 2.16 dapat diketahui bahwa transformasi wavelet adalah hasil kali dalam antara sinyal input  $x(t)$  dan *mother wavelet*  $\psi(a,b)$ . Dalam sinyal processing, adanya korelasi antara dua sinyal menghasilkan sebuah nilai koefisien. Pada transformasi *wavelet* ini nilai koefisien memberikan informasi seberapa cocok sinyal input dengan *mother wavelet* yang digunakan. Semakin besar nilai koefisien maka semakin cocok sinyal tersebut dengan *mother wavelet* yang digunakan dan berlaku sebaliknya.

Pada CWT proses translasi dan dilatasi dilakukan dengan perlahan, dimana koefisien *wavelet* dihitung berdasarkan setiap skala dan pergeseran yang memungkinkan. Hal ini menunjukkan nilai  $a$  dan  $b$  bisa bervariasi dari minus tak terhingga hingga tak terhingga [26].

#### 2.4.3 Discrete Wavelet Transform (DWT)

*Discrete wavelet transform* (DWT) atau transformasi *wavelet* diskrit adalah bentuk pengembangan dari CWT, dimana saat CWT dilatasi dan translasi dilakukan secara kontinu menghasilkan redundansi yang substansial. Sedangkan saat dilatasi dan translasi dilakukan secara diskrit akan lebih efisien dan dapat juga menghasilkan hasil yang akurat seperti CWT. Persamaan DWT dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$WT_{a,b}(n) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_0^{N-1} x(n) \psi\left(\frac{n-b}{a}\right) \quad (2.17)$$

Dengan  $x(n)$  adalah sinyal input yang ingin ditransformasikan,  $\psi(n)$  adalah fungsi *mother wavelet*,  $a$  dan  $b$  adalah variabel dilasi dan translasi. Pada DWT nilai  $a$  dan  $b$  ditentukan berdasarkan persamaan berikut :

$$a = a_0^m \quad (2.18)$$

$$b = nb_0 a_0^m \quad (2.19)$$

Dengan  $a_0 > 1$  yang merupakan faktor dilasi dan  $b_0$  merupakan faktor translasi yang nilainya bergantung pada  $a_0$  dan  $m, n$  adalah bilangan positif integer. Dengan mensubstitusikan persamaan 2.18 dan 2.19 ke dalam persamaan 2.14 maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (2.20)$$

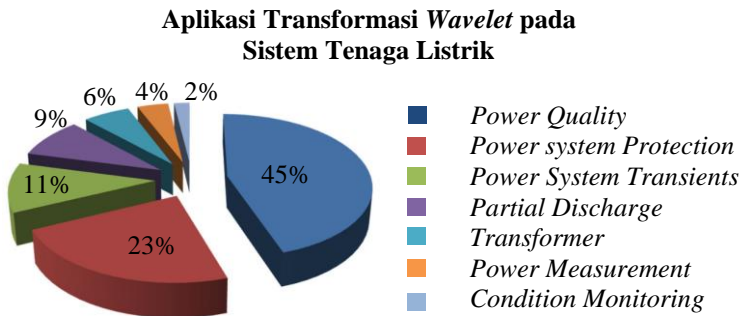
#### 2.4.4 Aplikasi Transformasi Wavelet

Transformasi *wavelet* sudah banyak diaplikasikan dalam berbagai bidang. Diawal tahun 1990an muncul banyak teori dan penelitian mengenai transformasi *wavelet* untuk analisa sinyal transien

dan sinyal non-stasioner [17]. Kemunculan transformasi *wavelet* ini membuat banyak penelitian dalam bidang sistem tenaga listrik terutama untuk menganalisa dan mendeteksi adanya gangguan transien dalam sistem tenaga listrik [18-23]. Gambar 2.14 menunjukkan persentase penggunaan transformasi *wavelet* dalam bidang sistem tenaga listrik.

Berdasarkan Gambar 2.14, bidang *power quality* mendominasi dalam aplikasi transformasi *wavelet* dengan 45% kemudian disusul oleh *power system protection* 23%. *Power system transients* dan *partial discharge* masing-masing 11% dan 9%. Terakhir memiliki nilai terkecil pada bidang *condition monitoring* sebesar 2%.

Salah satu aplikasi transformasi *wavelet* dalam sistem tenaga listrik adalah identifikasi dan deteksi gejala feroresonansi [7-11]. Banyak penelitian dan tulisan mengenai pendeteksian gejala feroresonansi menggunakan analisa transformasi *wavelet* salah satunya ditulis oleh Zhang yang melakukan analisa deteksi kegagalan yang disebabkan oleh feroresonansi menggunakan jenis transformasi *wavelet daubechies 5* [11]. Penelitian lainnya dilakukan oleh Siavash Beheshtaein, dalam tulisannya ia menggunakan jenis *wavelet daubechies 3* dan ia juga mengungkapkan bahwa jenis *mother wavelet* tersebut memberikan hasil yang lebih baik dibanding jenis *mother wavelet* lainnya [10]. Penelitian lain juga dilakukan menggunakan basis/*mother wavelet* yang berbeda-beda. Penelitian-penelitian sebelumnya yang telah dilakukan menjadi dasar acuan dalam studi ini sehingga diketahui basis/*mother wavelet* yang tepat digunakan untuk deteksi gejala feroresonansi.



**Gambar 2.14** Aplikasi Transformasi *Wavelet* pada Sistem Tenaga Listrik[24]

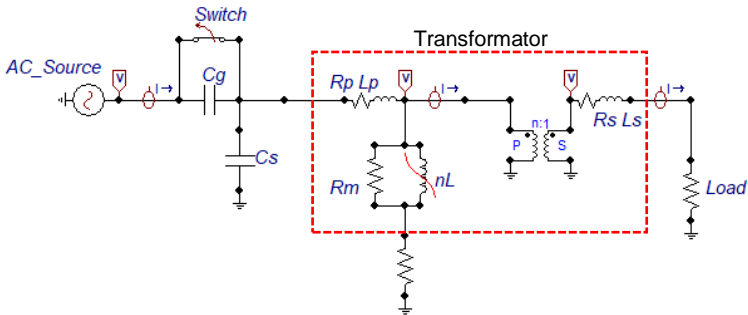
## BAB III

### PEMODELAN, SIMULASI DAN PENDETEKSIAN FERORESONANSI

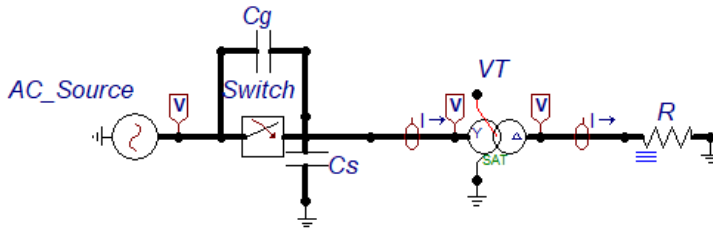
#### 3.1 Pemodelan Feroresonansi

Studi ini berfokus pada transformasi *wavelet* pada sinyal feroresonansi menggunakan berbagai jenis basis/*mother wavelet*. Untuk itu, studi ini membutuhkan sinyal feroresonansi sebagai sampel yang akan ditransformasikan dan dianalisa menggunakan transformasi *wavelet*. Pada studi ini, menggunakan empat sampel sinyal feroresonansi berdasarkan klasifikasi sinyal feroresonansi yang sudah dibahas pada bab sebelumnya yaitu mode *Fundamental*, mode *Subharmonic*, mode *Quasi-Periodic* dan mode *Chaotic*.

Pemodelan dan Simulasi sinyal feroresonansi menggunakan perangkat lunak ATPDraw atau yang biasa dikenal ATP/EMTP (*Alternative Transient Program-Electro-magnetic Transient Program*) yang sudah sering digunakan pada penelitian terdahulu sebagai perangkat lunak yang dapat melakukan simulasi transient pada sistem tenaga listrik [26]. Pada studi ini menggunakan dua macam pemodelan feroresonansi yaitu menggunakan trafo satu fasa dan trafo tiga fasa. Pemodelan sinyal feroresonansi trafo satu fasa dapat dilihat pada Gambar 3.1 sedangkan untuk trafo tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.1** Pemodelan Feroresonansi Trafo Satu Fasa



**Gambar 3.2** Pemodelan Feroresonansi Trafo Tiga Fasa

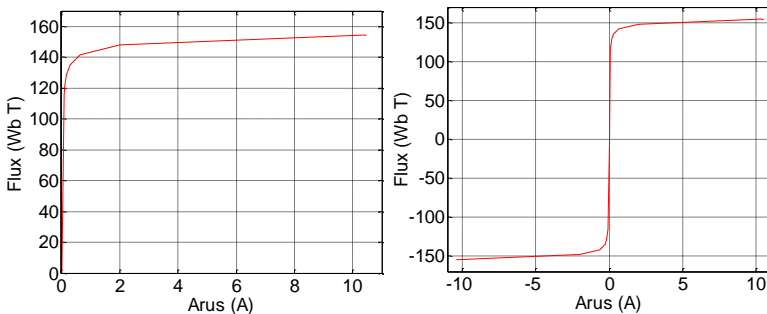
Kedua rangkaian diatas sama-sama dapat menghasilkan sinyal feroresonansi, perbedaannya pada rangkaian satu fasa digunakan untuk menghasilkan sinyal feroresonansi mode *fundamental* dan mode *subharmonic* sedangkan pada rangkaian pembangkit feroresonansi tiga fasa digunakan untuk menghasilkan sinyal feroresonansi mode *quasi periodic* dan mode *chaotic*. Kedua rangkaian diatas sama-sama memodelkan sumber tegangan AC 70 kV yang terhubung dengan *grading capacitance* ( $C_g$ ) paralel dengan *shunt capacitance* ( $C_s$ ) dan *switching* sebagai *trigger* untuk memunculkan fenomena feroresonansi yang dihubungkan dengan transformator dengan spesifikasi 70/6 kV 6MVA tipe inti M5 buatan PT. Bambang Djaja yang terhubung ke beban. Parameter rangkaian transformator dapat dilihat pada Tabel 3.1. Karakteristik induktansi non-linear pada inti transformator dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan Tabel 3.2. Nilai kapasitansi *grading capacitance* ( $C_g$ ) dan *shunt capacitance* ( $C_s$ ) divariasikan untuk mendapatkan mode feroresonansi yang diinginkan. *Switching* dibuka pada detik ke 0.1 s dengan total waktu simulasi selama 0.6 detik. Hal ini bertujuan agar dapat terekam mulai dari sinyal normal, transien hingga feroresonansi terjadi.

**Tabel 3.1** Spesifikasi Transformator tipe M5

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Primer	70	kV
Tegangan Sekunder	6	kV
Frekuensi	50	Hz
Resistansi Primer ( $R_p$ )	1,275396152	$\Omega$
Induktansi Primer ( $L_p$ )	0,029027625	mH
Resistansi Sekunder ( $R_s$ )	0,000485622	$\Omega$
Induktansi Sekunder ( $L_s$ )	0,066098551	mH
Resistansi Magnetisasi ( $R_m$ )	621567,2206	$\Omega$

**Tabel 3.2** Karakteristik Magnetisasi Inti Transformator tipe M5

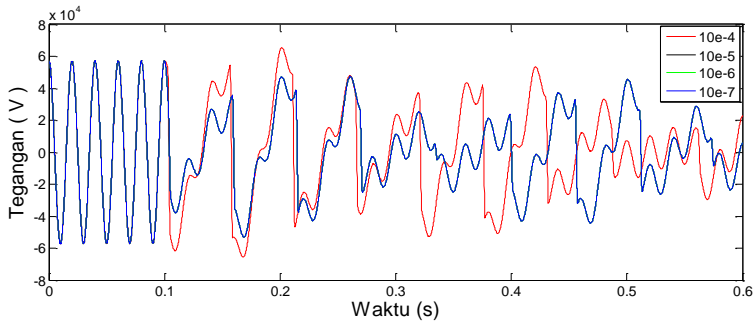
I (A)	Fluks (Wb T)
0.092974	115.9751
0.119986	122.4181
0.173745	128.8612
0.297362	135.3042
0.648669	141.7473
2.012322	148.1904
10.407776	154.6334



**Gambar 3.3** Kurva Karakteristik Magnetisasi Inti Transformator

### 3.2 Simulasi Pemodelan Feroresonansi

Pada bagian ini dilakukan simulasi dan pengambilan data sinyal feroresonansi menggunakan perangkat lunak ATPDraw. Sebelum melakukan simulasi perlu dilakukan pemilihan *time step* untuk mendapatkan keluaran sinyal feroresonansi yang diinginkan. Setelah *time step* ditentukan, simulasi dapat dilakukan untuk mendapatkan sinyal mode feroresonansi yang dibutuhkan sebagai sampel untuk melakukan studi transformasi wavelet. Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, salah satu cara untuk mendapatkan mode feroresonansi yang berbeda bisa dengan melakukan variasi terhadap nilai *grading capacitance*(Cg) dan *shunt capacitance*(Cs). Proses pemilihan kapasitansi dilakukan secara berulang dengan nilai yang berbeda-beda hingga didapatkan sinyal keluaran berupa sinyal tegangan mode feroresonansi yang diinginkan.



**Gambar 3.4** Plot Simulasi dengan variasi *time step*

### 3.2.1 Pemilihan *Time Step*

Berdasarkan CIGRE [27] sinyal feroresonansi dianggap sebagai sinyal transient frekuensi bawah dengan frekuensi maksimum 1 kHz. Oleh karena itu *time step* pada simulasi ini harus lebih besar dari 1kHz. Pemilihan *time step* dilakukan dengan melakukan simulasi pembangkitan sinyal feroresonansi dengan *time step* yang beragam yaitu : 0.1 $\mu$ s 1 $\mu$ s , 10 $\mu$ s dan 100 $\mu$ s .

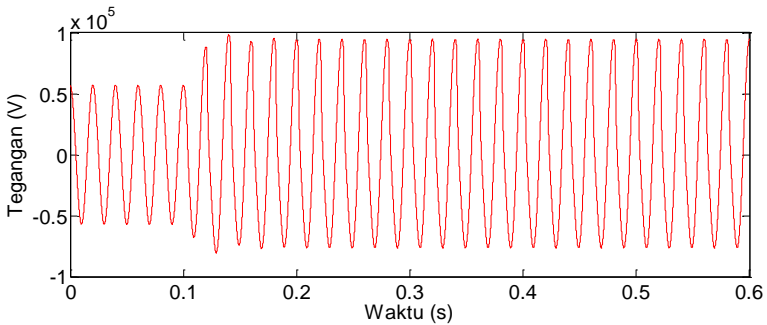
Pada Gambar 3.4 dapat diamati bahwa simulasi dengan *time step* 0.1 $\mu$ s 1 $\mu$ s dan 10 $\mu$ s menampilkan bentuk sinyal yang sama dan saling bertindihan berbeda dengan 100 $\mu$ s yang menampilkan sinyal yang kurang baik. Berdasarkan simulasi sederhana ini maka pada studi ini menggunakan 10 $\mu$ s sebagai *time step* simulasi untuk pengambilan data.

### 3.2.2 Mode *Fundamental*

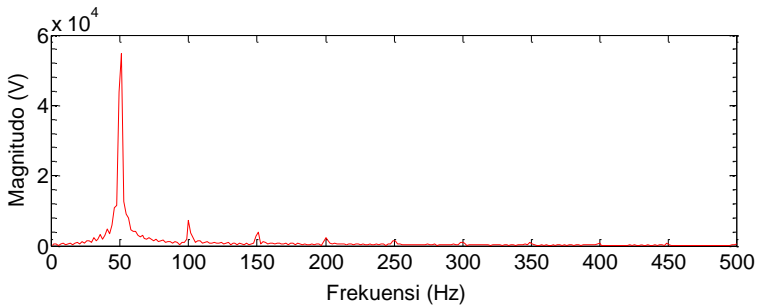
Sinyal feroresonansi mode *fundamental* didapatkan pada simulasi rangkaian pembangkit feroresonansi satu fasa dengan berdasarkan nilai parameter pada Tabel 3.3 .

**Tabel 3.3** Parameter Rangkaian pada Mode *Fundamental*

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Sumber ( $V_{LL}$ )	70	kV
<i>Grading Capacitance</i> ( $C_g$ )	0.1	$\mu$ F
<i>Shunt Capacitance</i> ( $C_s$ )	0.005	$\mu$ F
<i>Neutral Grounding</i>	10	k $\Omega$
Waktu <i>switching</i>	0.1	S



**Gambar 3.5** Sinyal Tegangan Feroresonansi Mode *Fundamental*



**Gambar 3.6** Spektrum Tegangan Feroresonansi Mode *Fundamental*

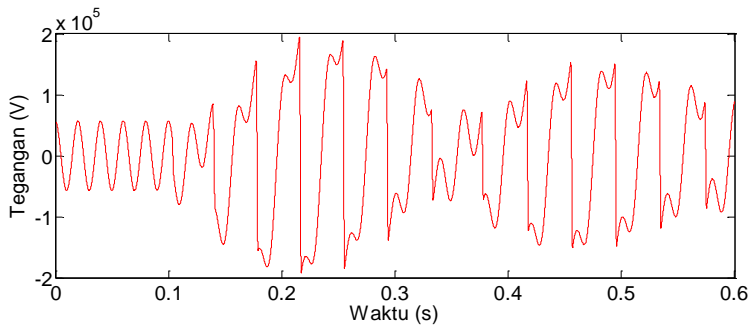
Pada mode ini sinyal tegangan feroresonansi merupakan sebuah sinyal periodik dan pada spektrum tegangan sinyal mengandung frekuensi dasar dari sistem yaitu 50Hz dan juga mengandung frekuensi kelipatan frekuensi sistem yaitu 100Hz, 150Hz dst, hal ini sesuai dengan teori yang sudah dibahas pada bab sebelumnya. Pada sinyal ini, nilai tegangan puncak pada keadaan normal yaitu sebesar 57.15 kV saat feroresonansi terjadi tegangan puncak naik hingga maksimum 98.45 kV pada saat transien dan stabil sekitar 94.47 kV pada saat feroresonansi *steady state*. Hal ini menandakan terjadinya *overvoltage* atau tegangan lebih hingga 172%.

### 3.2.3 Mode *Subharmonic*

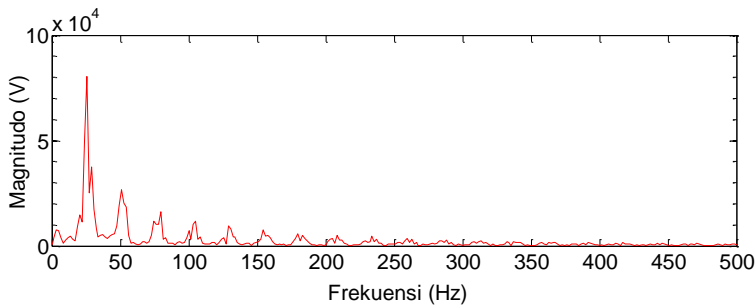
Sinyal feroresonansi mode *subharmonic* didapatkan pada simulasi rangkaian pembangkit feroresonansi satu fasa dengan berdasarkan nilai parameter pada Tabel 3.4 .

**Tabel 3.4** Parameter Rangkaian pada Mode *Subharmonic*

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Sumber ( $V_{LL}$ )	70	kV
Grading Capacitance ( $C_g$ )	0.2	$\mu F$
Shunt Capacitance ( $C_s$ )	0.05	$\mu F$
Neutral Grounding	10	$\Omega$
Waktu switching	0.1	s



**Gambar 3.7** Sinyal Tegangan Feroresonansi Mode *Subharmonic*



**Gambar 3.8** Spektrum Tegangan Feroresonansi Mode *Subharmonic*

Pada sinyal feroresonansi mode *subharmonic* ini dapat diamati saat feroresonansi terjadi, tegangan mengalami kenaikan yang sangat signifikan hingga mencapai 196 kV. Hal ini berarti tegangan mengalami *overvoltage* maksimum sebesar 243% dari tegangan normal. Pada spektrum tegangan dapat diamati frekuensi yang dominan adalah sekitar



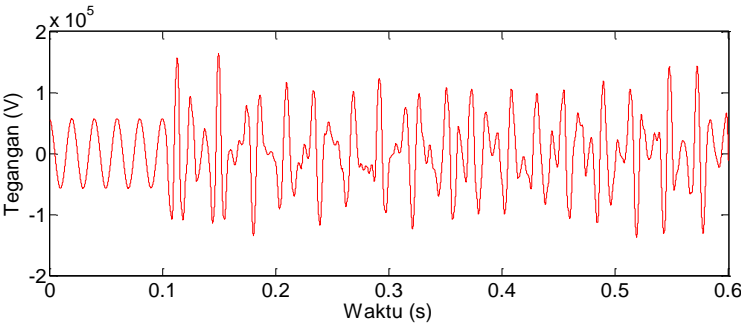
25Hz. Hal ini sesuai dengan karakteristik feroresonansi mode *subharmonic* yang sudah dibahas pada bab sebelumnya.

**3.2.4 Mode *Quasi Periodic***

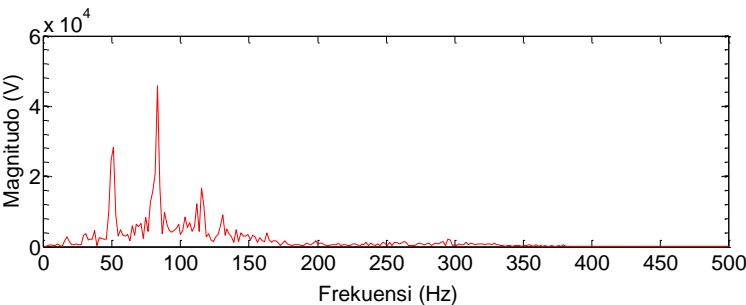
Sinyal feroresonansi mode *quasi-periodic* didapatkan pada simulasi rangkaian pembangkit feroresonansi tiga fasa, pada fasa A dengan berdasarkan nilai parameter pada Tabel 3.5 .

**Tabel 3.5** Parameter Rangkaian pada Mode *Quasi Periodic*

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Sumber ( $V_{LL}$ )	70	kV
<i>Grading Capacitance</i> ( $C_g$ )	1	$\mu F$
<i>Shunt Capacitance</i> ( $C_s$ )	0.05	$\mu F$
Waktu <i>switching</i>	0.1	s



**Gambar 3.9** Sinyal Tegangan Feroresonansi Mode *Quasi-Periodic*



**Gambar 3.10** Spektrum Tegangan Feroresonansi Mode *Quasi-Periodic*

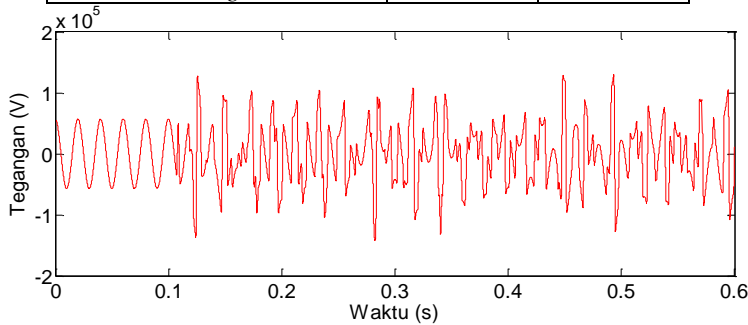
Pada Gambar 3.9 dapat diamati sinyal tegangan feroresonansi mode *quasi-periodic* . Pada mode ini, tegangan juga mengalami *overvoltage* hingga maksimum 183 kV yang juga melebihi 220% tegangan normal sistem.

### 3.2.5 Mode Chaotic

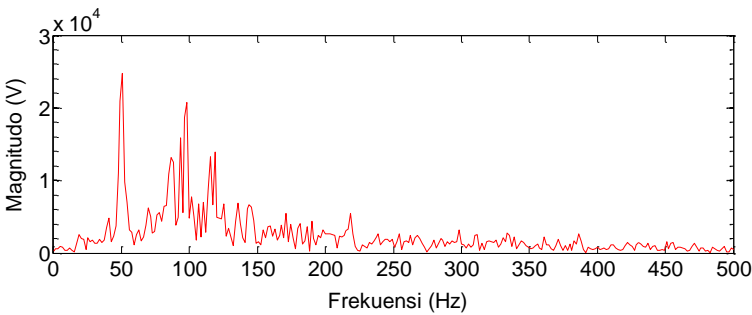
Sinyal feroresonansi mode *chaotic* didapatkan pada simulasi rangkaian pembangkit feroresonansi tiga fasa, pada fasa A dengan berdasarkan nilai parameter pada Tabel 3.6 .

**Tabel 3.6** Parameter Rangkaian pada Mode *Chaotic*

Parameter	Nilai	Satuan
Tegangan Sumber ( $V_{LL}$ )	70	kV
<i>Grading Capacitance</i> ( $C_g$ )	0.2	$\mu F$
<i>Shunt Capacitance</i> ( $C_s$ )	0.002	$\mu F$
Waktu <i>switching</i>	0.1	s



**Gambar 3.11** Sinyal Tegangan Feroresonansi Mode *Chaotic*



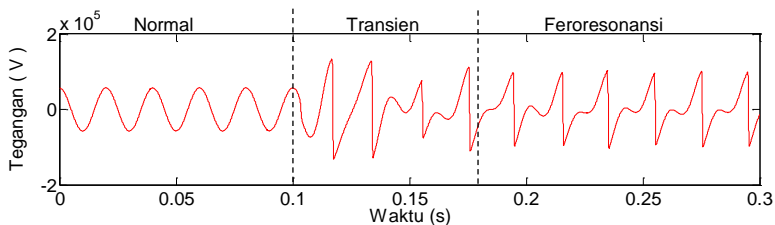
**Gambar 3.12** Spektrum Tegangan Feroresonansi Mode *Chotic*

Pada sinyal tegangan feroresonansi mode *chaotic* (Gambar 3.11) tegangan juga mengalami *overvoltage* hingga 150%. Pada Gambar 3.12 pada spektrum tegangan, bentuk spektrum cenderung kontinyu pada mode ini dibandingkan mode lain dan dengan frekuensi yang sangat beragam. Bentuk tegangan saat feroresonansi mode ini juga sangat tidak beraturan jika dibandingkan dengan mode lainnya.

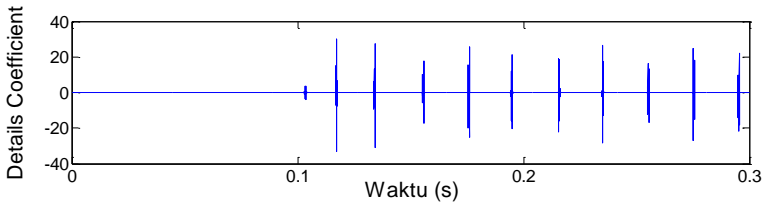
Pada tahap selanjutnya, setelah sampel sinyal feroresonansi didapatkan, sinyal tersebut akan ditransformasikan dari domain waktu ke bentuk domain lain yaitu domain *wavelet* menggunakan transformasi *wavelet*. Pada bab sebelumnya sudah dibahas mengenai jenis-jenis transformasi *wavelet* yaitu *continuous wavelet transform* (CWT) dan *discrete wavelet transform* (DWT). CWT merupakan konsep dasar dari transformasi *wavelet* sedangkan DWT adalah versi cepat dan efisien dari CWT [26]. Pada studi ini akan menggunakan DWT sebagai metode untuk menganalisis sinyal. Transformasi *wavelet* dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak MATLAB versi R2014a.

### 3.3 Deteksi Feroresonansi Metode Koefisien Detail

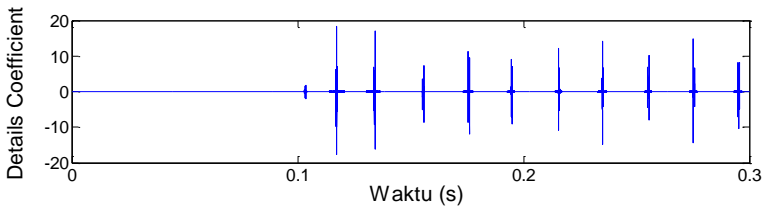
Salah satu keistimewaan dari transformasi *wavelet* adalah dapat mendeteksi adanya ketidaknormalan pada suatu sinyal [14]. Gambar 3.13 adalah sebuah gelombang feroresonansi dengan *trigger switching* pada detik ke 0.1s. Pada sinyal dapat diamati bahwa saat detik ke 0.1s yaitu pada saat *switching*, mulai terjadi inisiasi fenomena feroresonansi dengan adanya sinyal transient pada detik ke 0.1 sampai 0.18 lalu dilanjutkan dengan sinyal feroresonansi *steady state* hingga detik ke 0.3s. Sinyal ini kemudian ditransformasikan ke dalam bentuk transformasi *wavelet* menggunakan *mother wavelet Daubechies 5* (Db5) yang dapat dilihat pada Gambar 3.14.



**Gambar 3.13** Sinyal Sampel Deteksi Transient pada Feroresonansi



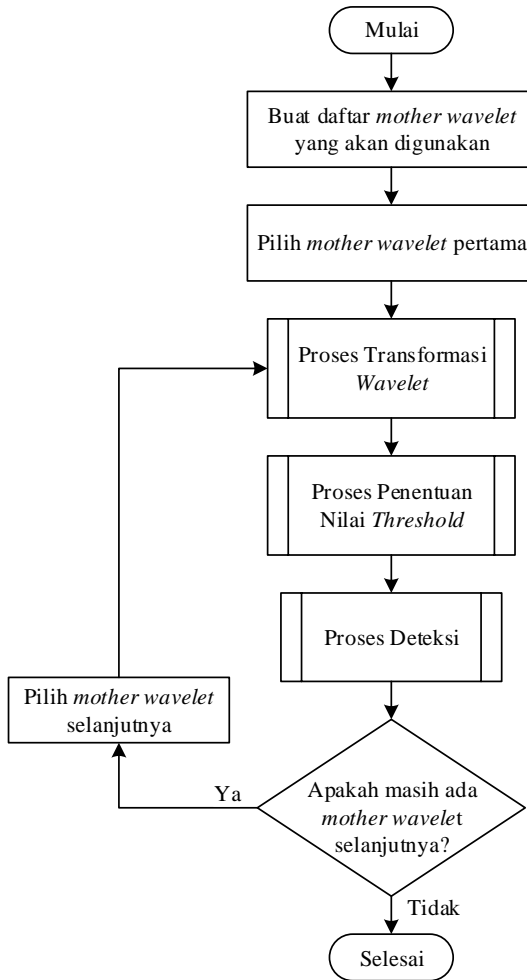
**Gambar 3.14** Sinyal *Details Coefficient* Transformasi *Wavelet Db 5*



**Gambar 3.15** Sinyal *Details Coefficient* Transformasi *Wavelet Dmey*

Sinyal hasil transformasi *wavelet* ini disebut koefisien detail. Saat keadaan normal, dapat diamati bahwa nilai koefisien detail sangat kecil sehingga terlihat seperti garis lurus, sedangkan saat mulai detik ke 0.1s, saat transien dan feroresonansi terjadi, mulai terdapat lonjakan nilai koefisien detail yang signifikan. Jenis *mother wavelet* lain juga menunjukkan hal yang serupa, contohnya pada Gambar 3.15 yang merupakan sinyal hasil transformasi *wavelet* menggunakan *mother wavelet discrete mayer*. Sekilas bentuk koefisien detail dari kedua *mother wavelet* terlihat sama, namun kedua sinyal tersebut memiliki rentang nilai koefisien detail yang berbeda. Sinyal koefisien *db5* memiliki nilai koefisien detail yang lebih besar dibanding *discrete mayer*.

Fungsi transformasi *wavelet* dalam mendeteksi adanya ketidaknormalan pada sinyal ini dapat digunakan untuk mendeteksi adanya fenomena feroresonansi pada suatu sinyal tegangan sistem tenaga listrik. Pada studi ini, pemilihan basis/*mother wavelet* akan dilakukan dengan membandingkan waktu saat feroresonansi terdeteksi dan nilai koefisien detail yang terdeteksi menggunakan basis/*mother wavelet* yang berbeda. Proses pengambilan data dibuat menjadi sebuah *list program* pada MATLAB. *List program* ini digambarkan menjadi sebuah diagram alur pada Gambar 3.16.



**Gambar 3.16** Diagram Alur Proses Pengambilan Data

Secara garis besar, proses pengambilan data terdiri dari empat tahapan yaitu :

1. Menentukan daftar basis/*mother wavelet* yang akan digunakan pada studi ini.

2. Mentransformasikan sinyal sampel feroresonansi ke dalam bentuk koefisien detail.
3. Melakukan analisa sinyal normal untuk mendapatkan nilai *threshold*
4. Melakukan proses deteksi gejala feroresonansi dengan membandingkan nilai koefisien detail dan nilai *threshold*. Menyimpan data waktu saat terdeteksi dan nilai koefisien detail yang terdeteksi.

### 3.3.1 Daftar *Mother Wavelet*

Pada studi ini menggunakan tujuh jenis *mother wavelet family* beserta anggotanya yang terdapat dalam DWT pada perangkat lunak MATLAB yaitu *haar*, *daubachies*, *symlets*, *coiflets*, *biorthogonal*, *reverse biorthogonal* dan *discrete mayer*. Dengan total sebanyak 54 basis/*mother wavelet* yang dapat dilihat pada Tabel 3.7.

**Tabel 3.7** DWT *Mother Wavelet* pada MATLAB

No.	<i>Mother Wavelet</i>	<i>Mother Wavelet Family</i>
1	<i>haar</i>	<i>Haar</i>
2	<i>db1</i>	<i>Daubachies</i>
3	<i>db2</i>	
4	<i>db3</i>	
5	<i>db4</i>	
6	<i>db5</i>	
7	<i>db6</i>	
8	<i>db7</i>	
9	<i>db8</i>	
10	<i>db9</i>	
11	<i>db10</i>	
12	<i>sym2</i>	<i>Symlets</i>
13	<i>sym3</i>	
14	<i>sym4</i>	
15	<i>sym5</i>	
16	<i>sym6</i>	
17	<i>sym7</i>	
18	<i>sym8</i>	
19	<i>coif1</i>	<i>Coiflets</i>
20	<i>coif2</i>	
21	<i>coif3</i>	

**Tabel 3.7** DWT *Mother Wavelet* pada MATLAB (Lanjutan)

No.	<i>Mother Wavelet</i>	<i>Mother Wavelet Family</i>
22	<i>coif4</i>	
23	<i>coif5</i>	
24	<i>bior1.1</i>	<i>Biorthogonal</i>
25	<i>bior1.3</i>	
26	<i>bior1.5</i>	
27	<i>bior2.2</i>	
28	<i>bior2.4</i>	
29	<i>bior2.6</i>	
30	<i>bior2.8</i>	
31	<i>bior3.1</i>	
32	<i>bior3.3</i>	
33	<i>bior3.5</i>	
34	<i>bior3.7</i>	
35	<i>bior3.9</i>	
36	<i>bior4.4</i>	
37	<i>bior5.5</i>	
38	<i>bior6.8</i>	
39	<i>rbio1.1</i>	<i>Reverse Biorthogonal</i>
40	<i>rbio1.3</i>	
41	<i>rbio1.5</i>	
42	<i>rbio2.2</i>	
43	<i>rbio2.4</i>	
44	<i>rbio2.6</i>	
45	<i>rbio2.8</i>	
46	<i>rbio3.1</i>	
47	<i>rbio3.3</i>	
48	<i>rbio3.5</i>	
49	<i>rbio3.7</i>	
50	<i>rbio3.9</i>	
51	<i>rbio4.4</i>	
52	<i>rbio5.5</i>	
53	<i>rbio6.8</i>	
54	<i>dmey</i>	<i>Discrete Mayer</i>

Daftar *mother wavelet* ini digunakan sebagai urutan penggunaan *mother wavelet* untuk transformasi *wavelet* DWT pada proses-proses selanjutnya. Setelah melewati proses deteksi dan data berhasil disimpan, proses pengambilan data akan mengulang dari transformasi *wavelet* dengan *mother wavelet* berikutnya hingga daftar *mother wavelet* terakhir.

**3.3.2 Proses Transformasi Wavelet**

Diagram alur proses transformasi *wavelet* ini dapat dilihat pada Gambar 3.17. Proses ini dimulai dengan masukan berupa data sampel sinyal mode feroresonansi yang sudah didapatkan sebelumnya. Sinyal ini kemudian ditransformasikan menggunakan DWT. Proses transformasi terdiri dari dua proses yaitu dekomposisi sinyal level 1 dengan *mother wavelet* yang telah ditentukan, lalu dilanjutkan dengan rekonstruksi koefisien detail.



**Gambar 3.17** Diagram Alur Proses Transformasi *Wavelet*



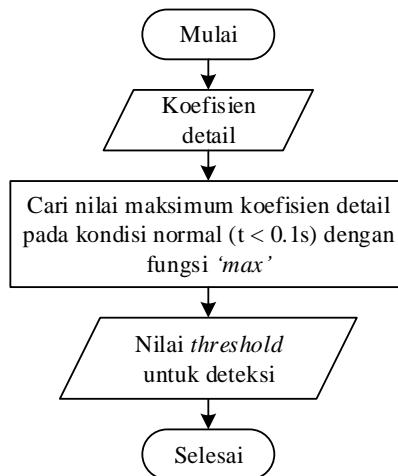
Kedua proses ini dijalankan pada MATLAB dengan menggunakan fungsi sebagai berikut :

```
[c,l] = wavedec(x,n,wname)
Y = wrcoef('d',c,l,wname,n)
```

Dengan  $[c,l]$  adalah vektor dekomposisi *wavelet* ( $c$ ) dan vektor pembukuan ( $l$ ), yang berisi jumlah koefisien berdasarkan level.  $x$  adalah sinyal masukan,  $n$  adalah level dekomposisi,  $wname$  adalah kode *mother wavelet* yang digunakan (*haar,db1,db2* dsb) dan  $Y$  adalah keluaran hasil rekonstruksi berupa koefisien detail.

### 3.3.3 Proses Penentuan Nilai *Threshold*

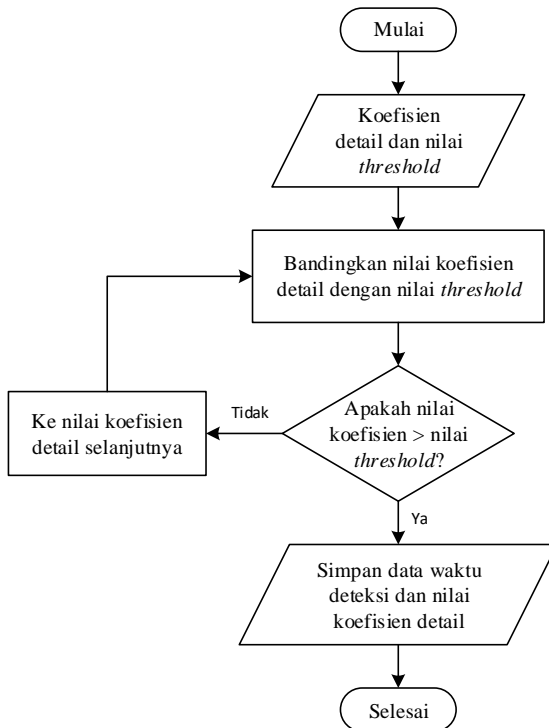
Sinyal sampel feroresonansi yang didapat pada subab sebelumnya merupakan gabungan antara sinyal normal ( $t < 0.1s$ , waktu *switching*), sinyal transien dan sinyal *steady state* feroresonansi. Sebelumnya diketahui bahwa saat sinyal mengalami gangguan terjadi lonjakan nilai koefisien detail yang signifikan jika dibandingkan dalam keadaan normal. Oleh karena itu, pada studi ini nilai maksimum koefisien detail pada saat keadaan normal dijadikan *threshold* untuk mendeteksi feroresonansi. Pada proses ini menggunakan dua fungsi MATLAB yaitu *abs* dan *max*. Fungsi *abs* digunakan untuk merubah nilai koefisien detail kedalam bentuk positif dan fungsi *max* untuk mencari nilai maksimum. Diagram alur pada proses ini ditunjukkan pada Gambar 3.18.



**Gambar 3.18** Diagram Alur Proses Penentuan *Threshold*

### 3.3.4 Proses Deteksi

Proses deteksi gejala feroresonansi ditunjukkan oleh diagram alur pada Gambar 3.19. Pada proses ini menggunakan fungsi eksekusi jika kondisi terpenuhi atau biasa dikenal dengan fungsi *if*. Pada proses ini, masukan berupa data nilai koefisien detail dan nilai *threshold*. Pada saat nilai koefisien detail lebih besar dari nilai *threshold* maka kondisi terpenuhi dan program akan menyimpan data berupa nilai koefisien detail saat kondisi terpenuhi dan urutan data koefisien detail saat kondisi terpenuhi (waktu deteksi).



**Gambar 3.19** Diagram Alur Proses Deteksi

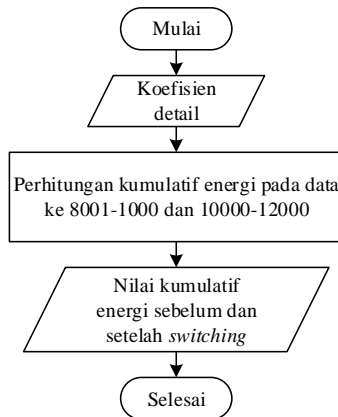
### 3.4 Deteksi Feroresonansi Metode Energi Kumulatif

Energi Kumulatif adalah suatu metode yang dapat digunakan untuk mengukur energi pada suatu sinyal. Energi kumulatif pada suatu sinyal dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]|^2 \quad (2.21)$$

Dengan  $E$  adalah energi kumulatif dalam waktu tertentu dan  $x[n]$  adalah amplitudo atau persamaan suatu sinyal. Pada studi ini sinyal sampel feroresonansi yang telah ditransformasikan ke dalam domain *wavelet* akan dideteksi menggunakan energi kumulatif. Pendeteksian dilakukan dengan menghitung energi kumulatif sebanyak satu *cycle* atau satu periode sebelum dan sesudah *switching* dilakukan pada koefisien detail hasil transformasi *wavelet* sebelumnya. Setelah itu dilakukan perbandingan rasio nilai energi kumulatif saat kondisi feroresonansi dan nilai energi kumulatif energi saat kondisi normal.

Pada studi ini menggunakan 10 $\mu$ s sebagai *time step* yang berarti pada setiap 1 detik sinyal terdiri dari 100,000 data sinyal. Oleh karena itu, pada satu periode sinyal yaitu  $1/f = 1/50\text{Hz} = 20\text{ms}$  terdiri dari 2,000 data sinyal. Sinyal sampel feroresonansi berdurasi selama 0.5s dan memiliki sebanyak 50,000 data sinyal. Hasil transformasi *wavelet* dalam bentuk koefisien detail juga terdiri dari 50,000 data sinyal. *Switching* dilakukan pada detik ke 0.1s yang berarti pada data ke 10,000. Energi kumulatif akan dihitung pada satu periode setelah dan sesudah *switching* yang berarti akan menghitung energi masing-masing sebanyak 2,000 data yaitu pada data ke 8,001-10,000 (sebelum *switching*) dan 10,001-12,000 (sesuda *switching*). Proses deteksi dengan metode kumulatif energi dapat dilihat pada Gambar 3.20.



**Gambar 3.20** Proses Deteksi Kumulatif Energi

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB IV

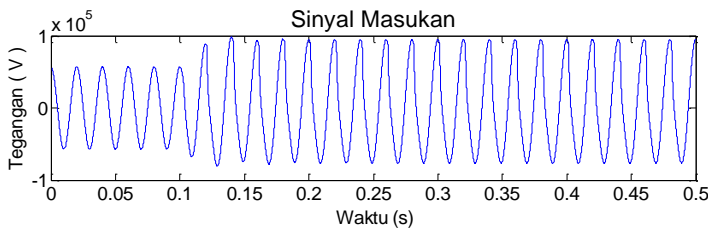
### PEMILIHAN BASIS WAVELET UNTUK DETEKSI FERORESONANSI

Pada bab ini akan dibahas hasil deteksi fenomena feroresonansi menggunakan metode yang telah dibahas pada bab sebelumnya dan melakukan analisis perbandingan terhadap data yang didapatkan berdasarkan klasifikasi mode feroresonansi dan berbagai jenis *mother wavelet* yang digunakan.

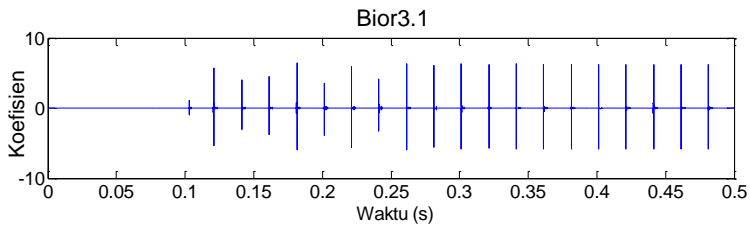
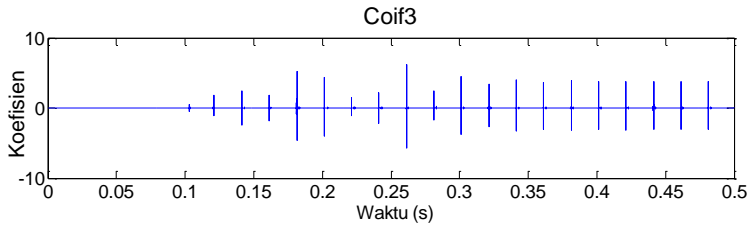
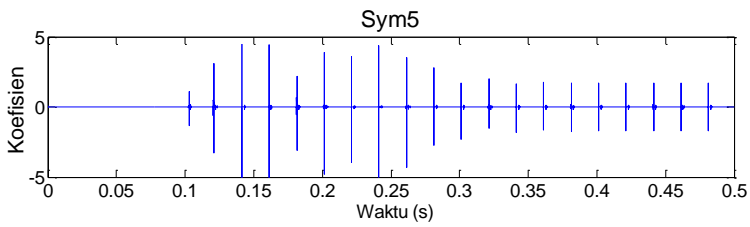
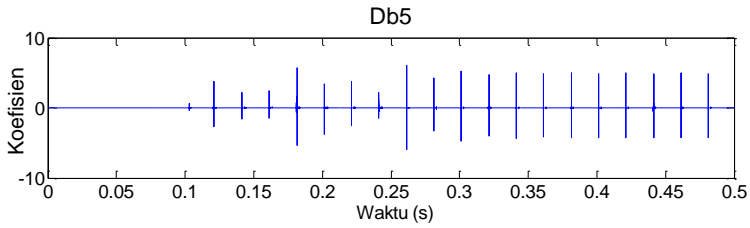
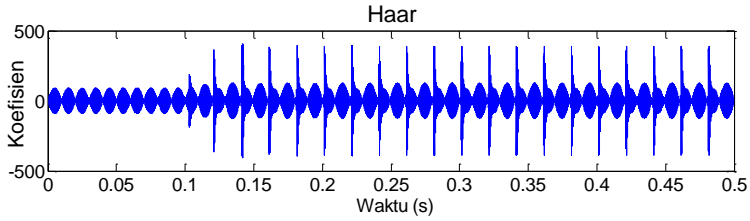
#### 4.1 Hasil Transformasi Wavelet

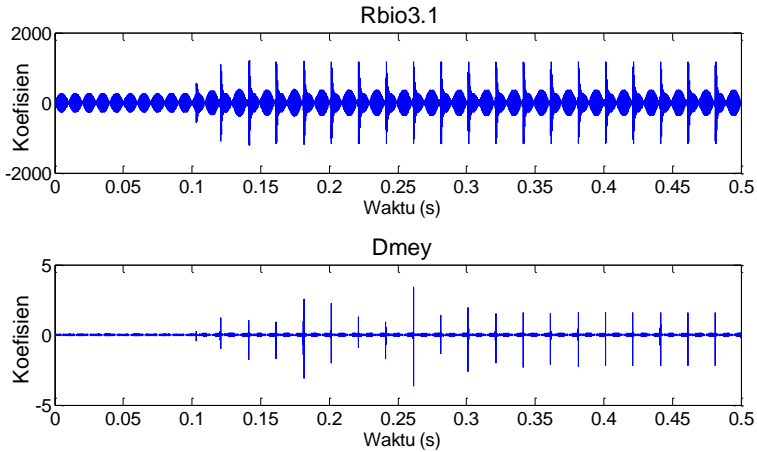
##### 4.1.1 Mode Fundamental

Sinyal sampel mode *fundamental* yang sudah didapat sebelumnya ditransformasikan ke dalam bentuk koefisien detail dengan menggunakan transformasi *wavelet* DWT. Gambar 4.1 menunjukkan sinyal masukan feroresonansi mode *fundamental* yang didapat pada bab sebelumnya dengan durasi waktu 0.5s dan Gambar 4.2 menampilkan beberapa hasil plot dari transformasi *wavelet* menggunakan *mother wavelet family* yang berbeda. Dapat diamati pada *mother wavelet haar* dan *rbio3.1* pada saat keadaan normal ( $t < 0.1s$ ) nilai koefisien detail membentuk gelombang periodik berbeda dengan yang lainnya yang hanya terlihat seperti garis lurus dikarenakan nilai koefisien yang terlalu kecil. Secara keseluruhan semua *mother wavelet* dapat membedakan antara keadaan normal dan keadaan feroresonansi. Namun, untuk membedakan sinyal transien hanya beberapa yang dapat memberikan hasil yang signifikan, diantaranya adalah *db5*, *sym5*, *coif3*, *bior3.1* dan *dmey*. Berdasarkan gambar dapat diamati transien terjadi kurang lebih pada detik ke 0.1 s hingga 0.3s. Rentang nilai koefisien detail tertinggi diperoleh pada *mother wavelet rbio3.1* sedangkan terendah pada *dmey*.



**Gambar 4.1** Sinyal Masukan Feroresonansi Mode *Fundamental*

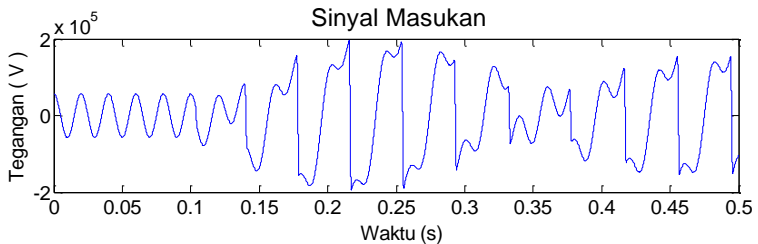




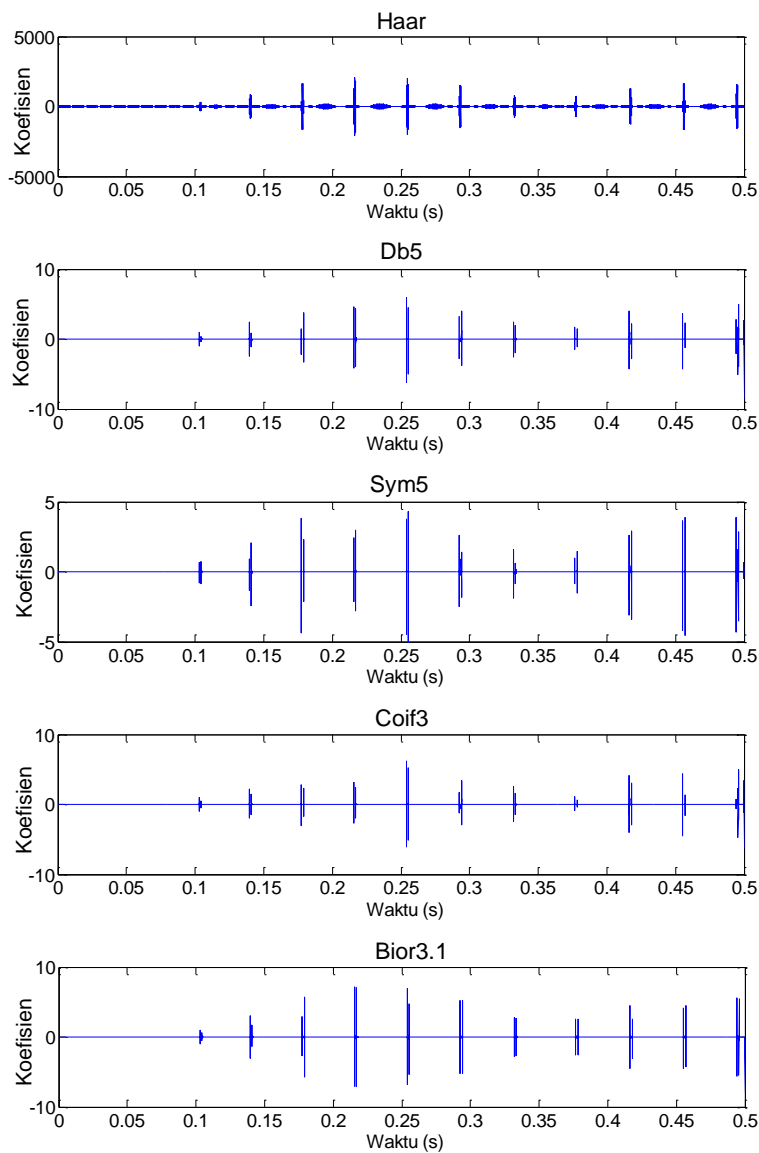
**Gambar 4.2** Hasil Transformasi *Wavelet Mode Fundamental*

#### 4.1.2 Mode *Subharmonic*

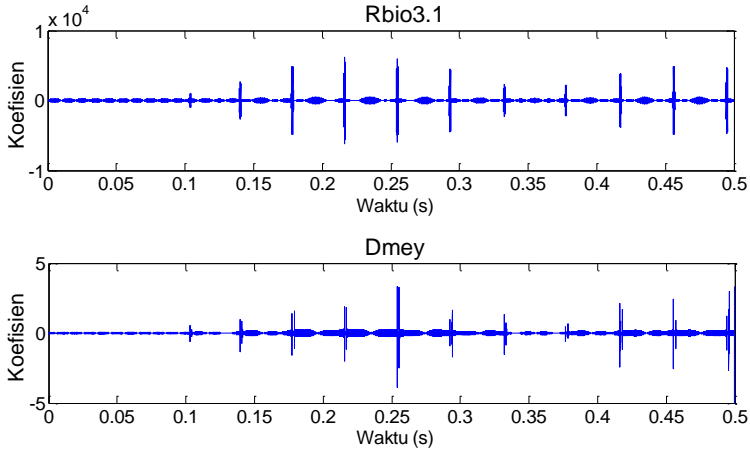
Masukan dan keluaran hasil transformasi *wavelet* pada mode ini dapat diamati pada Gambar 4.3 dan 4.4. Dapat diamati pola sinyal nilai koefisien detail mirip seperti sinyal masukan feroresonansi. Pada mode ini sinyal transien sulit dibedakan dengan kondisi *steady state* feroresonansi. Nilai koefisien detail tertinggi dan terendah sama seperti sebelumnya dipegang oleh *mother wavelet rbio3.1* dan *dmey*. Pada mode ini semua *mother wavelet* juga dapat membedakan antara keadaan normal dan keadaan feroresonansi. Berdasarkan hasil pengamatan, *bior3.1* menggambarkan pola yang lebih baik dan mendekati sinyal masukan dibanding yang lainnya.



**Gambar 4.3** Sinyal Masukan Feroresonansi Mode *Subharmonic*



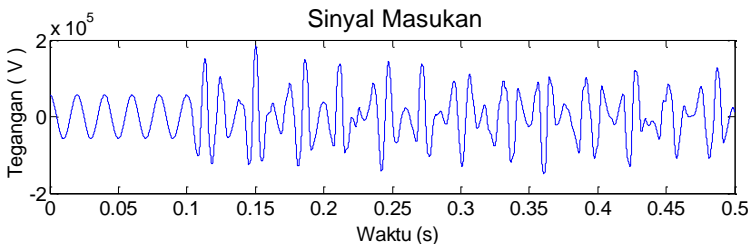




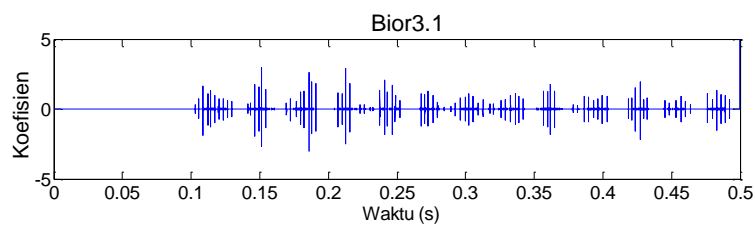
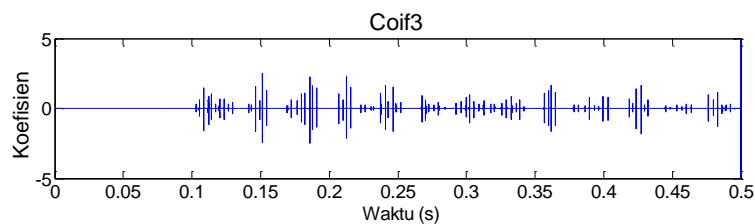
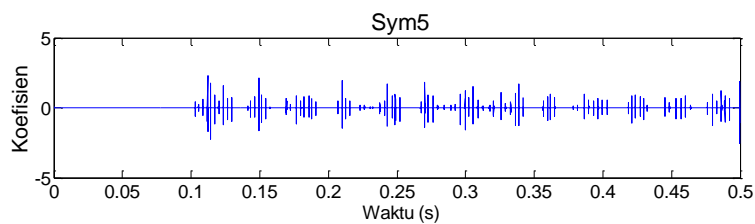
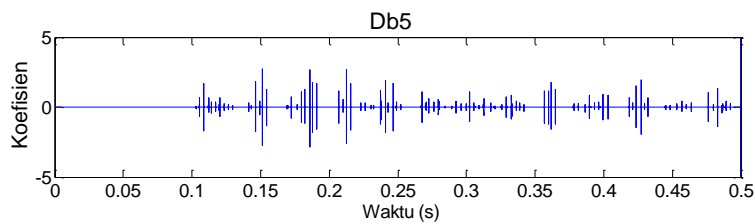
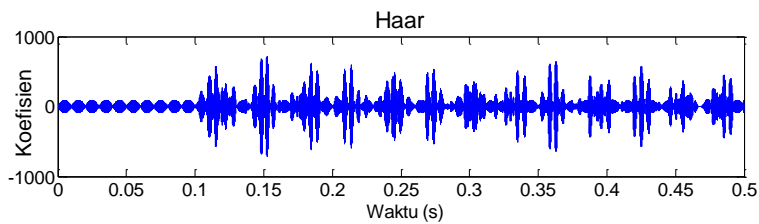
**Gambar 4.4** Hasil Transformasi *Wavelet Mode Subharmonic*

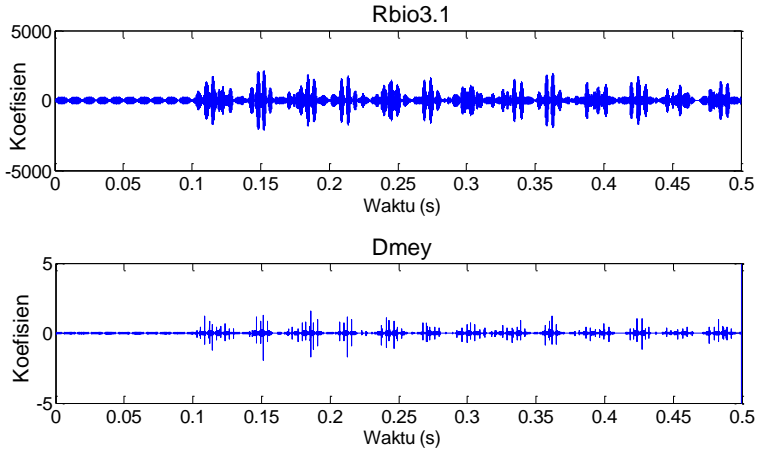
#### 4.1.3 Mode *Quasi-Periodic*

Mode feroresonansi ini tidak memiliki pola khusus seperti dua mode sebelumnya. Pada mode ini juga sulit membedakan antara transien dan kondisi *steady state*. Sinyal masukan dan keluaran transformasi *wavelet* pada mode ini dapat dilihat pada Gambar 4.5 dan 4.6. Pada dasarnya semua *mother wavelet* pada Gambar 4.6 dapat membedakan antara keadaan normal dan keadaan feroresonansi. Namun, pada *mother wavelet dmey* memiliki nilai koefisien detail yang sangat kecil dan perbandingan sinyal saat normal dan *steady state* tidak terlalu signifikan dibandingkan *mother wavelet* lainnya.



**Gambar 4.5** Sinyal Masukan Feroresonansi Mode *Quasi-Periodic*

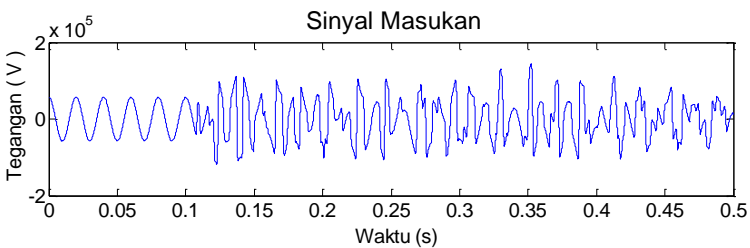




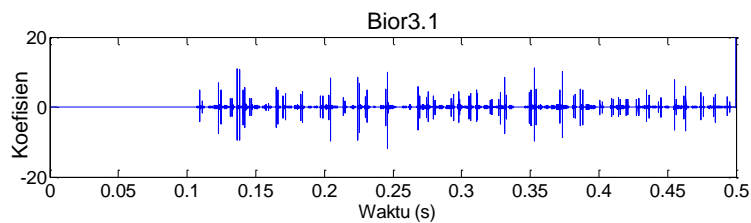
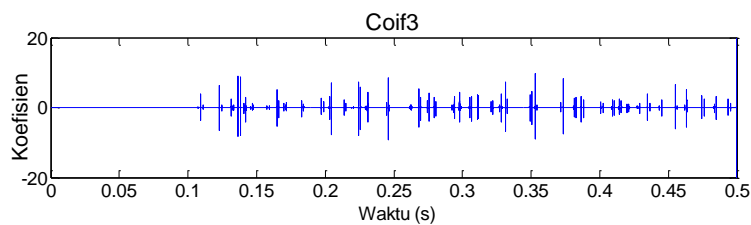
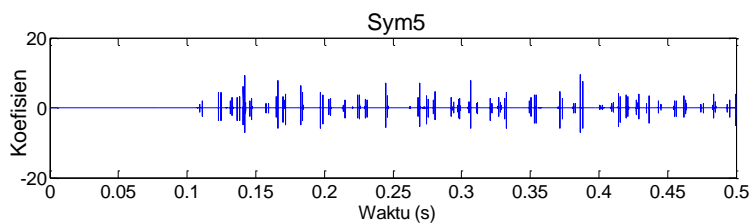
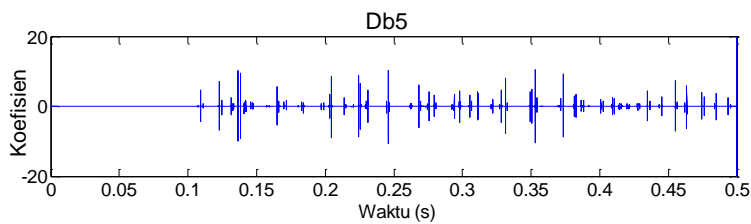
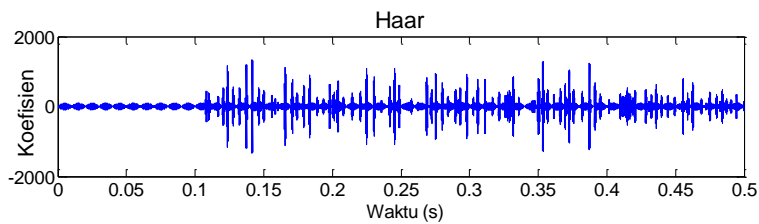
**Gambar 4.6** Hasil Transformasi *Wavelet Mode Quasi-Periodic*

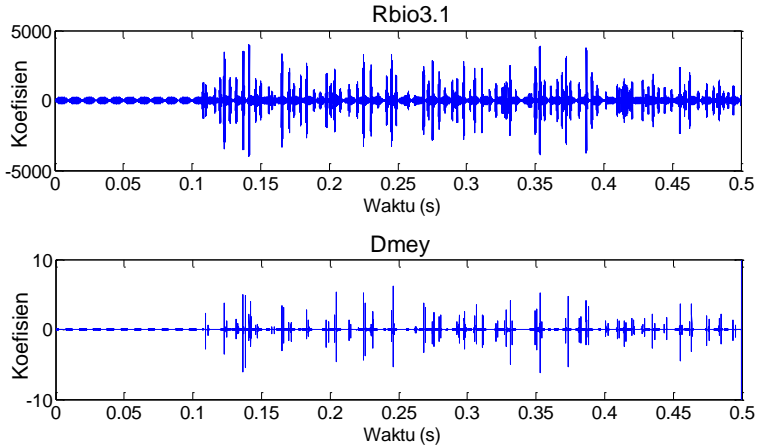
#### 4.1.4 Mode *Chaotic*

Sinyal feroresonansi pada mode ini juga merupakan sinyal feroresonansi yang tidak periodik. Sinyal masukan dan keluaran transformasi *wavelet* pada mode ini dapat diamati pada Gambar 4.7 dan 4.8. Sinyal feroresonansi mode *chaotic* merupakan sinyal dengan bentuk gelombang dan frekuensi yang tidak beraturan dan berpola dibandingkan dengan kondisi normal. Hal ini mengakibatkan sinyal mode ini paling mudah dideteksi oleh transformasi *wavelet*. Pada mode ini semua *mother wavelet* dapat mendeteksi adanya fenomena feroresonansi dan memiliki nilai koefisien yang lebih tinggi dibanding dengan mode lainnya. Perbedaan yang sangat signifikan antara kondisi normal dan kondisi feroresonansi terlihat pada *mother wavelet haar* dan *rbio3.1*.



**Gambar 4.7** Sinyal Masukan Feroresonansi Mode *Chaotic*





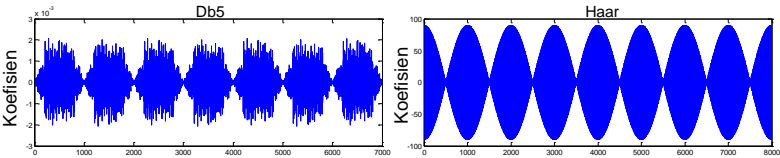
**Gambar 4.8** Hasil Transformasi *Wavelet Mode Chaotic*

## 4.2 Penentuan Nilai *Threshold*

Berdasarkan metode pada bab sebelumnya, nilai *threshold* didapatkan dari nilai maksimum koefisien detail sinyal feroresonansi pada saat keadaan normal yaitu saat  $t < 0.1$  s. Dengan menggunakan *timestep*  $10\mu\text{s}$ , maka pada sinyal sampel dengan durasi waktu satu detik akan mendapatkan 100,000 data. Untuk mendapatkan nilai koefisien detail maksimum saat sinyal kondisi normal, maka koefisien detail hanya dianalisa dari data 1 sampai 10000 atau 0.1 s dalam satuan waktu. Tabel 4.1 menunjukkan hasil nilai maksimum koefisien detail hasil transformasi *wavelet* sinyal mode feroresonansi pada kondisi normal. Contoh bentuk sinyal koefisien detail pada kondisi normal dapat dilihat pada Gambar 4.9.

Pada Tabel 4.1 menunjukan pada setiap sampel mode feroresonansi yang ditransformasikan pada kondisi normal, memiliki nilai koefisien detail yang sama. Namun, pada setiap *mother wavelet* menunjukkan nilai yang berbeda-beda dari yang terkecil oleh *bior3.5* yaitu sebesar 0.00211525 dan nilai terbesar oleh *rbio3.1* sebesar 269.3339229. Ada juga pada beberapa *mother wavelet* memiliki nilai koefisien detail yang sama yaitu pada *mother wavelet haar*, *db1*, *bior1.1* dan *rbio1.1* sebesar 89.77834334, pada *db2* dan *sym2* sebesar 0.245147794623939 dan pada *db3* dan *sym3* sebesar 0.0511165909509811. Hal ini dikarenakan *mother wavelet* tersebut pada dasarnya sama yaitu memiliki bentuk gelombang dan jumlah filter yang

sama. Adapun pada anggota *mother wavelet* yang bedekatan juga memiliki nilai koefisien yang tidak jauh berbeda seperti pada *bior1.3* dan *bior 1.5* yang memiliki nilai koefisien detail masing-masing sebesar 89.7785655483213 dan 89.7785666212049. Angka-angka ini yang akan menjadi nilai *threshold* untuk mendeteksi feroresonansi selanjutnya.



**Gambar 4.9** Koefisien Detail pada Kondisi Normal

**Tabel 4.1** Nilai Maksimum Koefisien Detail pada Kondisi Normal

No	Mother Wavelet	Nilai Maks Koefisien Detail Kondisi Normal (t<0.1s)			
		Fundamental	Sub harmonik	Quasi Periodik	Chaotik
1	haar	89.77834	89.77834	89.77834	89.77834
2	db1	89.77834	89.77834	89.77834	89.77834
3	db2	0.24515	0.24515	0.24515	0.24515
4	db3	0.00299	0.00299	0.00299	0.00299
5	db4	0.00223	0.00223	0.00223	0.00223
6	db5	0.00207	0.00207	0.00207	0.00207
7	db6	0.00207	0.00207	0.00207	0.00207
8	db7	0.00220	0.00220	0.00220	0.00220
9	db8	0.00227	0.00227	0.00227	0.00227
10	db9	0.00262	0.00262	0.00262	0.00262
11	db10	0.00263	0.00263	0.00263	0.00263
12	sym2	0.24515	0.24515	0.24515	0.24515
13	sym3	0.00299	0.00299	0.00299	0.00299
14	sym4	0.00199	0.00199	0.00199	0.00199
15	sym5	0.00223	0.00223	0.00223	0.00223
16	sym6	0.00207	0.00207	0.00207	0.00207
17	sym7	0.00263	0.00263	0.00263	0.00263
18	sym8	0.00214	0.00214	0.00214	0.00214
19	coif1	0.23399	0.23399	0.23399	0.23399
20	coif2	0.00202	0.00202	0.00202	0.00202
21	coif3	0.00204	0.00204	0.00204	0.00204
22	coif4	0.00210	0.00210	0.00210	0.00210
23	coif5	0.00216	0.00216	0.00216	0.00216

**Tabel 4.1** Nilai Maksimum Koefisien Detail pada Kondisi Normal  
(Lanjutan)

No	Mother Wavelet	Nilai Maks Koefisien Detail Kondisi Normal ( $t < 0.1s$ )			
		Fundamental	Sub harmonik	Quasi Periodik	Chaotik
24	<i>bior1.1</i>	89.77834	89.77834	89.77834	89.77834
25	<i>bior1.3</i>	89.77857	89.77857	89.77857	89.77857
26	<i>bior1.5</i>	89.77857	89.77857	89.77857	89.77857
27	<i>bior2.2</i>	0.14307	0.14307	0.14307	0.14307
28	<i>bior2.4</i>	0.14297	0.14297	0.14297	0.14297
29	<i>bior2.6</i>	0.14295	0.14295	0.14295	0.14295
30	<i>bior2.8</i>	0.14293	0.14293	0.14293	0.14293
31	<i>bior3.1</i>	0.00244	0.00244	0.00244	0.00244
32	<i>bior3.3</i>	0.00215	0.00215	0.00215	0.00215
<b>33</b>	<b><i>bior3.5</i></b>	<b>0.00212</b>	<b>0.00212</b>	<b>0.00212</b>	<b>0.00212</b>
34	<i>bior3.7</i>	0.00215	0.00215	0.00215	0.00215
35	<i>bior3.9</i>	0.00218	0.00218	0.00218	0.00218
36	<i>bior4.4</i>	0.00208	0.00208	0.00208	0.00208
37	<i>bior5.5</i>	0.00283	0.00283	0.00283	0.00283
38	<i>bior6.8</i>	0.00206	0.00206	0.00206	0.00206
39	<i>rbio1.1</i>	89.77834	89.77834	89.77834	89.77834
40	<i>rbio1.3</i>	0.00220	0.00220	0.00220	0.00220
41	<i>rbio1.5</i>	0.00221	0.00221	0.00221	0.00221
42	<i>rbio2.2</i>	0.42480	0.42480	0.42480	0.42480
43	<i>rbio2.4</i>	0.00204	0.00204	0.00204	0.00204
44	<i>rbio2.6</i>	0.00209	0.00209	0.00209	0.00209
45	<i>rbio2.8</i>	0.00213	0.00213	0.00213	0.00213
<b>46</b>	<b><i>rbio3.1</i></b>	<b>269.33392</b>	<b>269.33392</b>	<b>269.33392</b>	<b>269.33392</b>
47	<i>rbio3.3</i>	0.00354	0.00354	0.00354	0.00354
48	<i>rbio3.5</i>	0.00212	0.00212	0.00212	0.00212
49	<i>rbio3.7</i>	0.00215	0.00215	0.00215	0.00215
50	<i>rbio3.9</i>	0.00217	0.00217	0.00217	0.00217
51	<i>rbio4.4</i>	0.00199	0.00199	0.00199	0.00199
52	<i>rbio5.5</i>	0.00253	0.00253	0.00253	0.00253
53	<i>rbio6.8</i>	0.00207	0.00207	0.00207	0.00207
54	<i>dmey</i>	0.08060	0.08060	0.08060	0.08060

### 4.3 Deteksi Feroresonansi Metode Koefisien Detail

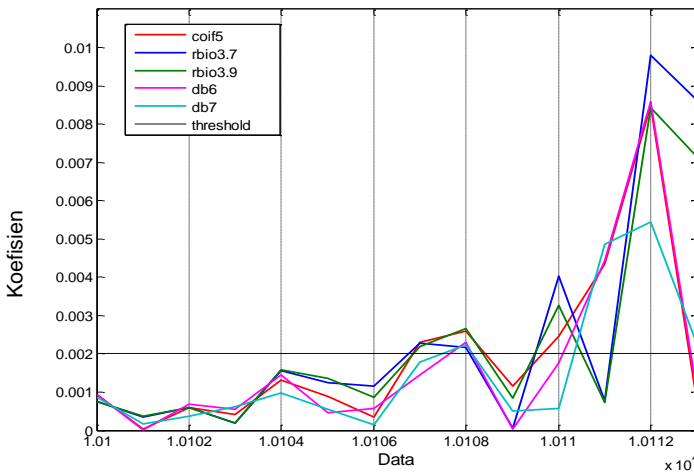
Pada bagian ini akan dipaparkan hasil deteksi feroresonansi menggunakan *threshold* yang sudah ditentukan sebelumnya. Pemilihan

basis/*mother wavelet* akan dilakukan berdasarkan kecepatan deteksi dan perbandingan rasio nilai yang terdeteksi dan nilai *threshold*.

#### 4.3.1 Mode Fundamental

Berikut ini pada Tabel 4.2 akan ditampilkan data hasil deteksi feroresonansi mode *fundamental* berdasarkan kecepatan deteksi feroresonansi. Pada tabel dapat dilihat bahwa *coif5*, *rbio3.7* dan *rbio3.9* mendeteksi feroresonansi paling cepat pada detik ke 0.10107s sedangkan deteksi terlama oleh *bior1.3*, *bior1.5* dan *rbio3.1* pada detik ke 0.10280s. Pada mode ini setiap *mother wavelet* dapat mendeteksi adanya gangguan pada sinyal dalam waktu kurang dari 3ms. Selain enam urutan terbawah pada Tabel 4.2, setiap *mother wavelet* dapat mendeteksi pada waktu kurang dari 1.15ms

Pada perbandingan rasio nilai koefisien dan nilai *threshold*, *mother wavelet bior3.5* memiliki nilai tertinggi sebesar 5.1226 disusul oleh *bior3.3* dan *bior3.7* sebesar 5.0496 dan 5.0052 pada detik ke 0.10112s. Gambar 4.10 menunjukkan perbandingan hasil transformasi wavelet koefisien detail lima *mother wavelet* tercepat yaitu *coif5*, *rbio3.7*, *rbio3.9*, *db6* dan *db7*. Pada gambar terlihat bahwa koefisien detail pada *mother wavelet* dalam *family* yang sama memiliki bentuk dan pola yang hampir sama seperti pada *rbio3.7* dan *rbio3.9* yang ditunjukkan pada garis berwarna biru dan hijau.



**Gambar 4.10** Perbandingan Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Fundamental* dengan Berbagai *Mother Wavelet*



Pada Gambar 4.10 juga dapat diamati jika dibandingkan antara lima *mother wavelet* tercepat, *mother wavelet bior3.7* menunjukkan nilai koefisien yang lebih tinggi dari pada yang lain pada detik ke 0.10110s dan 0.10112s. Berdasarkan data yang sudah didapatkan, untuk mode feroresonansi *fundamental* direkomendasikan menggunakan *mother wavelet bior3.7*, *coif5* atau *rbio3.9* untuk mendeteksi feroresonansi dengan cepat dan efektif.

**Tabel 4.2** Tabel Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Fundamental*

<i>Rank</i>	<i>Mother Wavelet</i>	<i>Threshold</i>	Waktu Deteksi (detik)	Nilai Koefisien Detail	Rasio Koefisien/ <i>Threshold</i>
1	<i>coif5</i>	<b>0.00216</b>	<b>0.10107</b>	<b>0.00230</b>	<b>1.0668</b>
	<i>rbio3.7</i>	<b>0.00215</b>	<b>0.10107</b>	<b>0.00229</b>	<b>1.0651</b>
	<i>rbio3.9</i>	<b>0.00217</b>	<b>0.10107</b>	<b>0.00220</b>	<b>1.0156</b>
2	<i>db6</i>	0.00207	0.10108	0.00230	1.1081
	<i>db7</i>	0.00220	0.10108	0.00223	1.0143
	<i>coif4</i>	0.00210	0.10108	0.00226	1.0742
	<i>bior6.8</i>	0.00206	0.10108	0.00214	1.0389
	<i>rbio5.5</i>	0.00253	0.10108	0.00257	1.0148
3	<i>db5</i>	0.00207	0.10110	0.00216	1.0434
	<i>bior3.9</i>	0.00218	0.10110	0.00229	1.0523
	<i>rbio2.4</i>	0.00204	0.10110	0.00226	1.1045
	<i>rbio2.8</i>	0.00213	0.10110	0.00225	1.0591
	<i>rbio3.5</i>	0.00212	0.10110	0.00476	2.2446
	<i>rbio4.4</i>	0.00199	0.10110	0.00203	1.0177
	<i>rbio6.8</i>	0.00207	0.10110	0.00218	1.0538
4	<i>db8</i>	0.00227	0.10111	0.00371	1.6333
	<i>sym4</i>	0.00199	0.10111	0.00756	3.7941
	<i>sym5</i>	0.00223	0.10111	0.00329	1.4747
	<i>sym6</i>	0.00207	0.10111	0.00624	3.0191
	<i>sym8</i>	0.00214	0.10111	0.00558	2.6148
	<i>coif2</i>	0.00202	0.10111	0.00674	3.3305
	<i>coif3</i>	0.00204	0.10111	0.00531	2.5951
	<i>bior4.4</i>	0.00208	0.10111	0.00515	2.4687
	<i>rbio1.5</i>	0.00221	0.10111	0.00348	1.5724
	<i>rbio2.6</i>	0.00209	0.10111	0.00493	2.3586
5	<i>db3</i>	0.00299	0.10112	0.00873	2.9243
	<i>db4</i>	0.00223	0.10112	0.01090	4.8895
	<i>db9</i>	0.00262	0.10112	0.00273	1.0400

**Tabel 4.2** Tabel Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Fundamental*  
(Lanjutan)

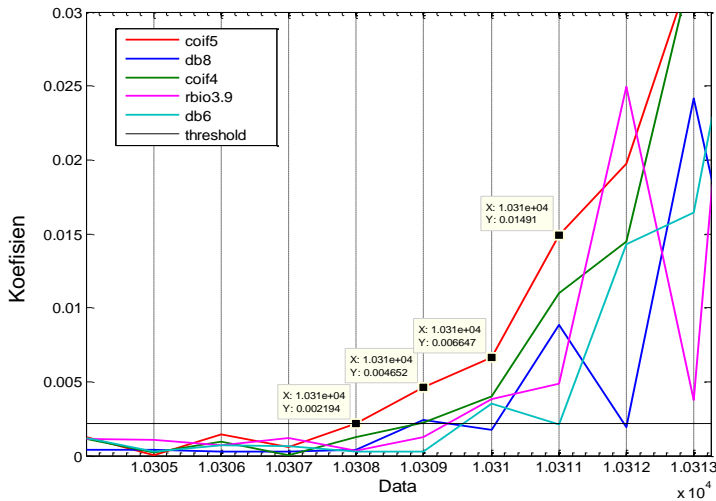
<i>Rank</i>	<i>Mother Wavelet</i>	<i>Threshold</i>	Waktu Deteksi (detik)	Nilai Koefisien Detail	Rasio Koefisien/ <i>Threshold</i>
	<i>db10</i>	0.00263	0.10112	0.00421	1.6009
	<i>sym3</i>	0.00299	0.10112	0.00873	2.9243
	<i>sym7</i>	0.00263	0.10112	0.00417	1.5852
	<i>bior3.1</i>	0.00244	0.10112	0.01050	4.3000
	<i>bior3.3</i>	0.00215	0.10112	0.01086	5.0496
	<i>bior3.5</i>	0.00212	0.10112	0.01084	5.1226
	<i>bior3.7</i>	0.00215	0.10112	0.01079	5.0052
	<i>dmey</i>	0.08060	0.10112	0.08170	1.0136
6	<i>db2</i>	0.24515	0.10113	0.24612	1.0040
	<i>sym2</i>	0.24515	0.10113	0.24612	1.0040
	<i>coif1</i>	0.23399	0.10113	0.23747	1.0149
	<i>bior2.4</i>	0.14297	0.10113	0.14343	1.0032
	<i>bior2.6</i>	0.14295	0.10113	0.14357	1.0043
	<i>bior2.8</i>	0.14293	0.10113	0.14362	1.0048
	<i>bior5.5</i>	0.00283	0.10113	0.00390	1.3768
	<i>rbio1.3</i>	0.00220	0.10113	0.01025	4.6667
	<i>rbio2.2</i>	0.42480	0.10113	0.43018	1.0126
7	<i>bior2.2</i>	0.14307	0.10114	0.16089	1.1246
8	<i>haar</i>	89.77834	0.10279	90.75000	1.0108
	<i>db1</i>	89.77834	0.10279	90.75000	1.0108
	<i>bior1.1</i>	89.77834	0.10279	90.75000	1.0108
	<i>rbio1.1</i>	89.77834	0.10279	90.75000	1.0108
9	<i>bior1.3</i>	89.77857	0.10280	91.74194	1.0219
	<i>bior1.5</i>	89.77857	0.10280	91.76277	1.0221
	<i>rbio3.1</i>	269.33392	0.10280	275.15259	1.0216

#### 4.3.2 Mode Subharmonic

Pada mode ini hasil deteksi feroresonansi dapat dilihat pada Tabel 4.3. Tabel diurutkan berdasarkan kecepatan deteksi feroresonansi. Pendeteksian tercepat dideteksi oleh *mother wavelet coif5* pada detik ke 0.10308s sedangkan deteksi terlama oleh *mother wavelet haar,db1 ,bior1.1* dan *rbio1.1* pada detik ke 0.10331s. Setiap *mother wavelet* pada mode ini mendeteksi mulai dari 3ms setelah *switching* dilakukan yaitu pada saat 0.103s. Dimulai dari *mother wavelet* tercepat yaitu *coif5* hingga *rbio2.2* mendeteksi feroresonansi dengan selisih waktu yang sangat kecil yaitu 0.00001s hingga 0.00002 sedangkan pada tujuh *mother wavelet* urutan terbawah yaitu *bior1.3, bior1.5, rbio3.1, haar, db1, bior1.1* dan

*rbio1.1* menunjukkan selisih yang cukup jauh yaitu 0.00013s hingga 0.00023s dibandingkan dengan *mother wavelet* lainnya. Gambar 4.11 menampilkan perbandingan koefisien detail deteksi lima *mother wavelet* tercepat pada mode *subharmonic*.

Pada Gambar 4.11 *mother wavelet* *coif5* berhasil mendeteksi lebih cepat dari pada *mother wavelet* yang lainnya. Pada detik berikutnya *coif5* juga mendeteksi dengan nilai koefisien yang lebih tinggi dari pada yang lainnya secara konsisten pada detik ke 0.10309s, 0.10310s dan 0.10311s. Pada gambar juga dapat diamati *coif4* memiliki pola deteksi yang sama seperti *coif5* namun dengan nilai koefisien yang lebih kecil. Pada mode feroresonansi ini *mother wavelet* *coif5* direkomendasikan untuk mendeteksi dengan cepat dan efektif.



**Gambar 4.11** Perbandingan Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Subharmonic* dengan Berbagai *Mother Wavelet*

**Tabel 4.3** Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Subharmonic*

Rank	Mother Wavelet	Threshold	Waktu Deteksi (detik)	Nilai Koefisien Detail	Rasio Koefisien/Threshold
1	coif5	0.00216	0.10308	0.00219	1.0177
2	db8	0.00227	0.10309	0.00239	1.0517
	coif4	0.00210	0.10309	0.00224	1.0628
3	db6	0.00207	0.10310	0.00354	1.7090

**Tabel 4.3** Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Subharmonic* (Lanjutan)

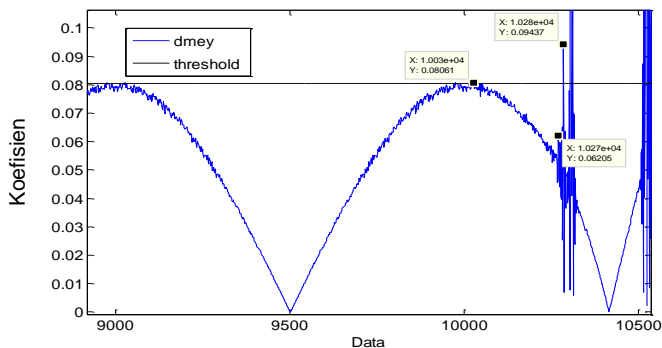
<i>Rank</i>	<i>Mother Wavelet</i>	<i>Threshold</i>	Waktu Deteksi (detik)	Nilai Koefisien Detail	Rasio Koefisien/ <i>Threshold</i>
	<i>db7</i>	0.00220	0.10310	0.00389	1.7690
	<i>coif3</i>	0.00204	0.10310	0.00236	1.1566
	<i>bior3.9</i>	0.00218	0.10310	0.00305	1.3987
	<i>bior6.8</i>	0.00206	0.10310	0.00415	2.0141
	<i>rbio3.9</i>	0.00217	0.10310	0.00385	1.7774
4	<i>db9</i>	0.00262	0.10311	0.00569	2.1672
	<i>sym6</i>	0.00207	0.10311	0.00222	1.0728
	<i>sym8</i>	0.00214	0.10311	0.01168	5.4663
	<i>bior3.5</i>	0.00212	0.10311	0.00217	1.0275
	<i>bior3.7</i>	0.00215	0.10311	0.00264	1.2255
	<i>rbio2.8</i>	0.00213	0.10311	0.00381	1.7900
	<i>rbio3.7</i>	0.00215	0.10311	0.00743	3.4618
	<i>rbio6.8</i>	0.00207	0.10311	0.00984	4.7563
5	<i>db4</i>	0.00223	0.10312	0.00563	2.5265
	<i>db5</i>	0.00207	0.10312	0.01194	5.7662
	<i>sym5</i>	0.00223	0.10312	0.00462	2.0712
	<i>sym7</i>	0.00263	0.10312	0.00698	2.6562
	<i>coif2</i>	0.00202	0.10312	0.00369	1.8222
	<i>bior4.4</i>	0.00208	0.10312	0.00614	2.9465
	<i>bior5.5</i>	0.00283	0.10312	0.00328	1.1575
	<i>rbio2.6</i>	0.00209	0.10312	0.00401	1.9197
	<i>rbio3.5</i>	0.00212	0.10312	0.00592	2.7891
	<i>rbio5.5</i>	0.00253	0.10312	0.01566	6.1918
6	<i>db3</i>	0.00299	0.10313	0.00815	2.7308
	<i>sym3</i>	0.00299	0.10313	0.00815	2.7308
	<i>sym4</i>	0.00199	0.10313	0.00206	1.0355
	<i>bior3.3</i>	0.00215	0.10313	0.00862	4.0071
	<i>rbio1.5</i>	0.00221	0.10313	0.00856	3.8690
	<i>rbio2.4</i>	0.00204	0.10313	0.00869	4.2500
	<i>rbio3.3</i>	0.00354	0.10313	0.00697	1.9698
	<i>rbio4.4</i>	0.00199	0.10313	0.00431	2.1666
7	<i>db10</i>	0.00263	0.10314	0.00333	1.2648
8	<i>bior3.1</i>	0.00244	0.10315	0.04944	20.2500
	<b><i>rbio1.3</i></b>	<b>0.00220</b>	<b>0.10315</b>	<b>0.04797</b>	<b>21.8333</b>
	<i>dmey</i>	0.08060	0.10315	0.09673	1.2000
9	<i>db2</i>	0.24515	0.10317	0.32788	1.3375
	<i>sym2</i>	0.24515	0.10317	0.32788	1.3375

**Tabel 4.3** Hasil Deteksi Ferroresonansi Mode *Subharmonic* (Lanjutan)

Rank	Mother Wavelet	Threshold	Waktu Deteksi (detik)	Nilai Koefisien Detail	Rasio Koefisien/Threshold
	<i>coif1</i>	0.23399	0.10317	0.47324	2.0225
	<i>bior2.2</i>	0.14307	0.10317	0.26929	1.8823
	<i>bior2.4</i>	0.14297	0.10317	0.26984	1.8873
	<i>bior2.6</i>	0.14295	0.10317	0.26997	1.8886
	<i>bior2.8</i>	0.14293	0.10317	0.27003	1.8892
	<i>rbio2.2</i>	0.42480	0.10317	0.80811	1.9023
10	<i>bior1.3</i>	89.77857	0.10330	91.25208	1.0164
	<i>bior1.5</i>	89.77857	0.10330	91.31763	1.0171
	<i>rbio3.1</i>	269.33392	0.10330	279.31970	1.0371
11	<i>haar</i>	89.77834	0.10331	101.93164	1.1354
	<i>db1</i>	89.77834	0.10331	101.93164	1.1354
	<i>bior1.1</i>	89.77834	0.10331	101.93164	1.1354
	<i>rbio1.1</i>	89.77834	0.10331	101.93164	1.1354

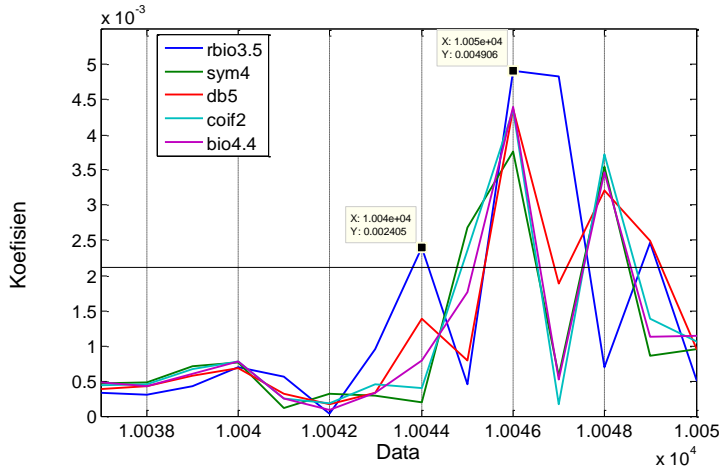
### 4.3.3 Mode *Quasi-Periodic*

Hasil deteksi ferroresonansi mode *quasi-periodic* dapat dilihat pada Tabel 4.4. Pada mode ini sebanyak 32 *mother wavelet* mampu mendeteksi ferroresonansi kurang dari 0.5ms saat *switching* dilakukan sedangkan sisanya mampu mendeteksi ferroresonansi lebih dari 2ms. Deteksi tercepat dideteksi oleh *mother wavelet dmey* pada 0.10027s namun dengan nilai koefisien yang sedikit lebih besar 0.0001 dari nilai *threshold*. Gambar 4.12 menunjukkan hasil deteksi ferroresonansi mode *quasi-periodic* dengan menggunakan *mother wavelet dmey*.



**Gambar 4.12** Deteksi Ferroresonansi Mode *Quasi-Periodic* Mother Wavelet Dmey

Pada gambar dapat diamati, *mother wavelet dmey* mendeteksi nilai melebihi *threshold* pada detik ke 0.10027s namun berdasarkan gambar, sinyal mengalami perubahan yang signifikan pada detik ke 0.10270s dan melebihi *threshold* kembali pada detik ke 0.10284s. Pada Gambar 4.13 menampilkan hasil deteksi feroresonansi dari beberapa *mother wavelet* dengan waktu deteksi yang berbeda dipilih setiap *mother wavelet family* yang berbeda. Pada gambar dapat diamati *mother wavelet rbio3.5* mampu mendeteksi dengan cepat pada 0.10044s dan pada waktu 0.10046s juga mendeteksi dengan nilai yang lebih tinggi dibanding yang lainnya. Pada mode ini *mother wavelet rbio3.5* direkomendasikan untuk mendeteksi feroresonansi dengan cepat dan efektif.



**Gambar 4.13** Perbandingan Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Quasi-Periodic* dengan Berbagai *Mother Wavelet*

**Tabel 4.4** Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Quasi-Periodic*

Rank	Mother Wavelet	Threshold	Waktu Deteksi (detik)	Nilai Koefisien Detail	Rasio Koefisien/Threshold
1	<i>dmey</i>	0.08060	0.10027	0.08061	1.0001
2	<b><i>rbio3.5</i></b>	<b>0.00212</b>	<b>0.10044</b>	<b>0.00241</b>	<b>1.1340</b>
3	<i>sym4</i>	0.00199	0.10045	0.00268	1.3428
	<i>sym6</i>	0.00207	0.10045	0.00221	1.0706
	<i>coif2</i>	0.00202	0.10045	0.00235	1.1623
	<i>rbio2.4</i>	0.00204	0.10045	0.00259	1.2687

**Tabel 4.4** Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Quasi-Periodic* (Lanjutan)

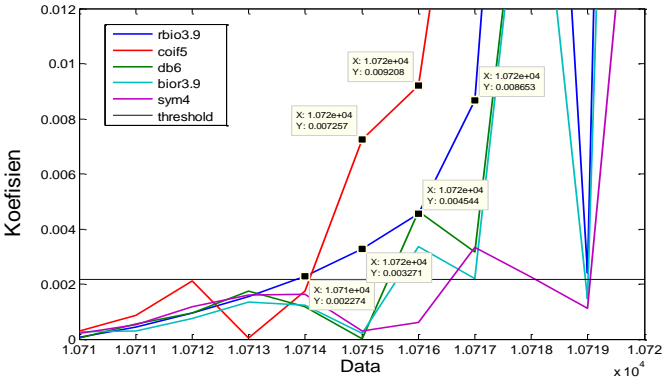
<i>Rank</i>	<i>Mother Wavelet</i>	<i>Threshold</i>	<i>Waktu Deteksi (detik)</i>	<i>Nilai Koefisien Detail</i>	<i>Rasio Koefisien/Threshold</i>
	<i>rbio3.3</i>	0.00354	0.10045	0.00371	1.0474
	<i>rbio4.4</i>	0.00199	0.10045	0.00305	1.5307
4	<i>db3</i>	0.00299	0.10046	0.00316	1.0567
	<i>db4</i>	0.00223	0.10046	0.00418	1.8739
	<i>db5</i>	0.00207	0.10046	0.00437	2.1089
	<i>db6</i>	0.00207	0.10046	0.00352	1.6977
	<i>db7</i>	0.00220	0.10046	0.00221	1.0046
	<i>sym3</i>	0.00299	0.10046	0.00316	1.0567
	<i>sym8</i>	0.00214	0.10046	0.00323	1.5100
	<i>coif3</i>	0.00204	0.10046	0.00383	1.8733
	<i>coif4</i>	0.00210	0.10046	0.00356	1.6939
	<i>coif5</i>	0.00216	0.10046	0.00342	1.5869
	<i>bior3.1</i>	0.00244	0.10046	0.00439	1.8000
	<i>bior3.3</i>	0.00215	0.10046	0.00426	1.9787
	<i>bior3.5</i>	0.00212	0.10046	0.00418	1.9766
	<i>bior3.7</i>	0.00215	0.10046	0.00415	1.9276
	<i>bior3.9</i>	0.00218	0.10046	0.00415	1.9034
	<i>bior4.4</i>	0.00208	0.10046	0.00440	2.1098
	<i>bior6.8</i>	0.00206	0.10046	0.00383	1.8570
	<i>rbio2.6</i>	0.00209	0.10046	0.00437	2.0912
	<i>rbio2.8</i>	0.00213	0.10046	0.00404	1.8975
	<i>rbio3.7</i>	0.00215	0.10046	0.00384	1.7912
	<i>rbio3.9</i>	0.00217	0.10046	0.00342	1.5790
	<i>rbio6.8</i>	0.00207	0.10046	0.00387	1.8718
5	<i>sym7</i>	0.00263	0.10047	0.00279	1.0611
	<i>rbio1.3</i>	0.00220	0.10047	0.00317	1.4444
6	<i>rbio5.5</i>	0.00253	0.10234	0.00260	1.0294
7	<i>db8</i>	0.00227	0.10235	0.00303	1.3345
	<i>db9</i>	0.00262	0.10235	0.00268	1.0225
	<i>sym5</i>	0.00223	0.10235	0.00370	1.6594
	<i>rbio1.5</i>	0.00221	0.10235	0.00352	1.5931
8	<i>db10</i>	0.00263	0.10261	0.00303	1.1530
9	<i>bior5.5</i>	0.00283	0.10264	0.00288	1.0179
10	<i>db2</i>	0.24515	0.10285	0.29432	1.2006
	<i>sym2</i>	0.24515	0.10285	0.29432	1.2006
	<i>coif1</i>	0.23399	0.10285	0.31886	1.3627
	<i>bior2.2</i>	0.14307	0.10285	0.18604	1.3003

**Tabel 4.4** Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Quasi-Periodic* (Lanjutan)

Rank	Mother Wavelet	Threshold	Waktu Deteksi (detik)	Nilai Koefisien Detail	Rasio Koefisien/Threshold
	bior2.4	0.14297	0.10285	0.18951	1.3255
	bior2.6	0.14295	0.10285	0.19089	1.3354
	bior2.8	0.14293	0.10285	0.19163	1.3407
	rbio2.2	0.42480	0.10285	0.55713	1.3115
11	haar	89.77834	0.10309	90.58301	1.0090
	db1	89.77834	0.10309	90.58301	1.0090
	bior1.1	89.77834	0.10309	90.58301	1.0090
	rbio1.1	89.77834	0.10309	90.58301	1.0090
12	bior1.3	89.77857	0.10310	91.47461	1.0189
	bior1.5	89.77857	0.10310	91.47610	1.0189
	rbio3.1	269.33392	0.10310	274.31982	1.0185

**4.3.4 Mode Chaotic**

Hasil deteksi feroresonansi pada mode ini dapat dilihat pada Tabel 4.5. Hasil deteksi menunjukan setiap *mother wavelet* dapat mendeteksi adanya gangguan kurang dari 8ms saat *switching* dilakukan. Waktu deteksi tercepat dideteksi oleh *rbio3.9* pada 0.10714s sedangkan diposisi terakhir oleh *haar*, *db1*,*bior1.1*,*bior1.3*, *bior1.5*, *rbio1.1*, dan *rbio3.1* pada 0.10757s. Feroresonansi mode ini dideteksi dalam waktu yang lebih lama dibandingkan dengan mode lain. Pada Gambar 4.14 menampilkan hasil deteksi feroresonansi dari beberapa *mother wavelet* yang berbeda.



**Gambar 4.14** Perbandingan Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Chaotic* dengan Berbagai *Mother Wavelet*



Pada gambar dapat diamati bahwa ada dua *mother wavelet* dengan nilai koefisien detail konsisten naik secara signifikan saat deteksi feroresonansi yaitu *bior3.9* dan *coif5*. Pada mode feroresonansi ini, untuk mendeteksi feroresonansi dengan cepat dan akurat direkomendasikan menggunakan *mother wavelet bior3.9* atau *coif5*.

**Tabel 4.5** Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Chaotic*

<i>Rank</i>	<i>Mother Wavelet</i>	<i>Threshold</i>	Waktu Deteksi (detik)	Nilai Koefisien Detail	Rasio Koefisien/ <i>Threshold</i>
<b>1</b>	<b><i>rbio3.9</i></b>	<b>0.00217</b>	<b>0.10714</b>	<b>0.00227</b>	<b>1.0499</b>
2	<i>db8</i>	0.00227	0.10715	0.00412	1.8119
	<i>db9</i>	0.00262	0.10715	0.00409	1.5593
	<i>coif4</i>	0.00210	0.10715	0.00362	1.7183
	<b><i>coif5</i></b>	<b>0.00216</b>	<b>0.10715</b>	<b>0.00726</b>	<b>3.3667</b>
3	<i>db6</i>	0.00207	0.10716	0.00462	2.2324
	<i>db7</i>	0.00220	0.10716	0.00560	2.5435
	<i>coif3</i>	0.00204	0.10716	0.00273	1.3351
	<i>bior3.9</i>	0.00218	0.10716	0.00337	1.5448
	<i>bior6.8</i>	0.00206	0.10716	0.00546	2.6457
	<i>rbio2.8</i>	0.00213	0.10716	0.00226	1.0638
	<i>rbio3.7</i>	0.00215	0.10716	0.00290	1.3515
4	<i>sym4</i>	0.00199	0.10717	0.00333	1.6691
	<i>sym6</i>	0.00207	0.10717	0.00223	1.0775
	<i>sym7</i>	0.00263	0.10717	0.00360	1.3695
	<i>sym8</i>	0.00214	0.10717	0.01602	7.4984
	<i>bior3.7</i>	0.00215	0.10717	0.00267	1.2372
	<i>rbio2.6</i>	0.00209	0.10717	0.00318	1.5228
	<i>rbio4.4</i>	0.00199	0.10717	0.00318	1.5972
	<i>rbio6.8</i>	0.00207	0.10717	0.01381	6.6759
5	<i>db4</i>	0.00223	0.10718	0.00761	3.4111
	<i>db5</i>	0.00207	0.10718	0.01708	8.2478
	<i>sym5</i>	0.00223	0.10718	0.00676	3.0321
	<i>coif2</i>	0.00202	0.10718	0.00415	2.0527
	<i>bior3.5</i>	0.00212	0.10718	0.00735	3.4725
	<i>bior4.4</i>	0.00208	0.10718	0.00791	3.7960
	<i>bior5.5</i>	0.00283	0.10718	0.00495	1.7498
	<i>rbio3.5</i>	0.00212	0.10718	0.01040	4.9056
	<i>rbio5.5</i>	0.00253	0.10718	0.02388	9.4434
	<i>dmey</i>	0.08060	0.10718	0.08808	1.0927
6	<i>db3</i>	0.00299	0.10719	0.01253	4.1968

**Tabel 4.5** Hasil Deteksi Feroresonansi Mode *Chaotic* (Lanjutan)

<i>Rank</i>	<i>Mother Wavelet</i>	<i>Threshold</i>	Waktu Deteksi (detik)	Nilai Koefisien Detail	Rasio Koefisien/ <i>Threshold</i>
	<i>db10</i>	0.00263	0.10719	0.00506	1.9242
	<i>sym3</i>	0.00299	0.10719	0.01253	4.1968
	<i>bior3.3</i>	0.00215	0.10719	0.01254	5.8298
	<i>rbio1.5</i>	0.00221	0.10719	0.01309	5.9172
	<i>rbio2.4</i>	0.00204	0.10719	0.01335	6.5299
7	<i>rbio3.3</i>	0.00354	0.10719	0.01392	3.9310
	<i>bior3.1</i>	0.00244	0.10721	0.07495	30.7000
	<i>rbio1.3</i>	0.00220	0.10721	0.07593	34.5556
8	<i>db2</i>	0.24515	0.10722	0.28597	1.1665
	<i>sym2</i>	0.24515	0.10722	0.28597	1.1665
9	<i>coif1</i>	0.23399	0.10723	0.64419	2.7531
	<i>bior2.2</i>	0.14307	0.10723	0.36523	2.5529
	<i>bior2.4</i>	0.14297	0.10723	0.36972	2.5859
	<i>bior2.6</i>	0.14295	0.10723	0.37123	2.5970
	<i>bior2.8</i>	0.14293	0.10723	0.37210	2.6034
	<i>rbio2.2</i>	0.42480	0.10723	1.09595	2.5799
10	<i>haar</i>	89.77834	0.10757	97.56836	1.0868
	<i>db1</i>	89.77834	0.10757	97.56836	1.0868
	<i>bior1.1</i>	89.77834	0.10757	97.56836	1.0868
	<i>bior1.3</i>	89.77857	0.10757	90.29419	1.0057
	<i>bior1.5</i>	89.77857	0.10757	90.21024	1.0048
	<i>rbio1.1</i>	89.77834	0.10757	97.56836	1.0868
	<i>rbio3.1</i>	269.33392	0.10757	270.45288	1.0042

Berdasarkan seluruh data yang didapatkan pada setiap mode, ada beberapa *mother wavelet* yang dapat cepat mendeteksi feroresonansi pada semua mode. Tabel 4.6 menunjukkan urutan rata-rata *rank* pada setiap *mother wavelet* pada setiap mode feroresonansi. Pada tabel dapat dilihat posisi tertinggi diperoleh *mother wavelet coif5* yang secara konsisten dapat mendeteksi feroresonansi dengan cepat dengan rata-rata *rank* sebesar 2.00 disusul oleh *rbio3.9* dan *coif4* dengan rata-rata 2.25 dan 2.50. Pada *mother wavelet daubechies*, *db6* dan *db7* memberikan performansi yang baik dan konsisten dengan rata-rata 3.00. Beberapa *mother wavelet* tidak direkomendasikan untuk mendeteksi feroresonansi adalah sebagai berikut: *haar*, *db1*, *bior1.1*, *rbio1.1*, *bior1.3*, *bior1.5* dan *rbio3.1*.

Beberapa *mother wavelet* tersebut mendeteksi feroresonansi pada selisih waktu yang cukup lama dibandingkan dengan yang lainnya.

**Tabel 4.6** *Rank Mother Wavelet Berdasarkan Kecepatan Deteksi Feroresonansi*

No	Mother Wavelet	Rank				Rata-rata
		Fundamental	Subharmonic	Quasi-Periodic	Chaotic	
1	<i>coif5</i>	1	1	4	2	2.00
2	<i>rbio3.9</i>	1	3	4	1	2.25
3	<i>coif4</i>	2	2	4	2	2.50
4	<i>rbio3.7</i>	1	4	4	3	3.00
5	<i>db6</i>	2	3	4	3	3.00
6	<i>db7</i>	2	3	4	3	3.00
7	<i>bior6.8</i>	2	3	4	3	3.00
8	<i>bior3.9</i>	3	3	4	3	3.25
9	<i>rbio2.8</i>	3	4	4	3	3.50
10	<i>coif3</i>	4	3	4	3	3.50
11	<i>rbio3.5</i>	3	5	2	5	3.75
12	<i>rbio6.8</i>	3	4	4	4	3.75
13	<i>db8</i>	4	2	7	2	3.75
14	<i>sym6</i>	4	4	3	4	3.75
15	<i>rbio4.4</i>	3	6	3	4	4.00
16	<i>sym8</i>	4	4	4	4	4.00
17	<i>db5</i>	3	5	4	5	4.25
18	<i>sym4</i>	4	6	3	4	4.25
19	<i>coif2</i>	4	5	3	5	4.25
20	<i>rbio2.6</i>	4	5	4	4	4.25
21	<i>bior3.7</i>	5	4	4	4	4.25
22	<i>rbio5.5</i>	2	5	6	5	4.50
23	<i>rbio2.4</i>	3	6	3	6	4.50
24	<i>bior4.4</i>	4	5	4	5	4.50
25	<i>db9</i>	5	4	7	2	4.50
26	<i>bior3.5</i>	5	4	4	5	4.50
27	<i>rbio3.3</i>	4	6	3	6	4.75
28	<i>db4</i>	5	5	4	5	4.75
29	<i>sym7</i>	5	5	5	4	4.75
30	<i>dmey</i>	5	8	1	5	4.75
31	<i>sym5</i>	4	5	7	5	5.25
32	<i>db3</i>	5	6	4	6	5.25
33	<i>sym3</i>	5	6	4	6	5.25

**Tabel 4.6** *Rank Mother Wavelet Berdasarkan Kecepatan Deteksi Ferroresonansi (Lanjutan)*

No	Mother Wavelet	Rank				Rata-rata
		Fundamental	Subharmonic	Quasi-Periodic	Chaotic	
34	<i>bior3.3</i>	5	6	4	6	5.25
35	<i>rbio1.5</i>	4	6	7	6	5.75
36	<i>bior3.1</i>	5	8	4	7	6.00
37	<i>bior5.5</i>	6	5	9	5	6.25
38	<i>db10</i>	5	7	8	6	6.50
39	<i>rbio1.3</i>	6	8	5	7	6.50
40	<i>db2</i>	6	9	10	8	8.25
41	<i>sym2</i>	6	9	10	8	8.25
42	<i>coif1</i>	6	9	10	9	8.50
43	<i>bior2.4</i>	6	9	10	9	8.50
44	<i>bior2.6</i>	6	9	10	9	8.50
45	<i>bior2.8</i>	6	9	10	9	8.50
46	<i>rbio2.2</i>	6	9	10	9	8.50
47	<i>bior2.2</i>	7	9	10	9	8.75
48	<i>haar</i>	8	11	11	10	10.00
49	<i>db1</i>	8	11	11	10	10.00
50	<i>bior1.1</i>	8	11	11	10	10.00
51	<i>rbio1.1</i>	8	11	11	10	10.00
52	<i>bior1.3</i>	9	10	12	10	10.25
53	<i>bior1.5</i>	9	10	12	10	10.25
54	<i>rbio3.1</i>	9	10	12	10	10.25

#### 4.4 Deteksi Ferroresonansi Metode Energi Kumulatif

Pada bagian ini akan dipaparkan hasil perhitungan energi kumulatif yang telah dibahas pada bab sebelumnya. Pemilihan basis *wavelet* akan dilakukan dengan memerhatikan rasio nilai energi kumulatif satu periode sesudah dan sebelum *switching* dilakukan.

Hasil perhitungan energi kumulatif pada mode *fundamental* dapat dilihat pada Tabel 4.7. *Mother wavelet* diurutkan berdasarkan rasio terbesar. Pada tabel dapat diamati beberapa *mother wavelet* memiliki rasio energi kumulatif yang sangat besar, energi kumulatif dalam kondisi ferroresonansi melebihi 10,000 kali dari energi kumulatif dalam keadaan normal, diantaranya adalah *rbio5.5*, *rbio3.3*, *db3*, *sym3* dan *rbio1.3*. Beberapa *mother wavelet* juga memiliki rasio yang lebih rendah

dibandingkan dengan yang lainnya yaitu pada *mother wavelet bior1.5, bior1.3, haar, db1, bior1.1, rbio1.1* dan *rbio3.1*. Pada Tabel 4.8 energi kumulatif pada mode *subharmonic* juga menunjukkan hasil yang tidak terlalu berbeda dengan mode *fundamental* dengan rasio tertinggi oleh *mother wavelet rbio3.3*.

**Tabel 4.7** Energi Kumulatif Mode *Fundamental*

No	Mother Wavelet	Kumulatif Energi		Rasio (Fero:Normal)
		Normal	Feroresonansi	
1	<i>rbio5.5</i>	0.000863667	12.0452486	13946.64
2	<b><i>rbio3.3</i></b>	<b>0.005783002</b>	<b>74.83415158</b>	<b>12940.36</b>
3	<i>db3</i>	0.00134431	14.62218176	10877.09
4	<i>sym3</i>	0.00134431	14.62218176	10877.09
5	<i>rbio1.3</i>	0.001314096	13.84343293	10534.56
6	<i>rbio3.5</i>	0.000852831	6.339476279	7433.45
7	<i>rbio4.4</i>	0.000845236	5.18021687	6128.72
8	<i>rbio2.4</i>	0.000838442	4.869554367	5807.86
9	<i>sym5</i>	0.000849233	4.857063174	5719.35
10	<i>rbio1.5</i>	0.00089988	4.254951576	4728.36
11	<i>bior5.5</i>	0.000884969	3.801764055	4295.93
12	<i>db4</i>	0.000853336	3.640996768	4266.78
13	<i>db9</i>	0.000864831	3.436335144	3973.42
14	<i>db8</i>	0.000846441	3.341284089	3947.45
15	<i>sym4</i>	0.000839154	3.166542405	3773.49
16	<i>sym7</i>	0.000866792	3.198826794	3690.42
17	<i>db10</i>	0.000874957	2.528270046	2889.59
18	<i>rbio3.7</i>	0.000849057	2.385797169	2809.94
19	<i>bior3.1</i>	0.001137009	3.117296738	2741.67
20	<i>bior3.3</i>	0.000939011	2.563117634	2729.59
21	<i>bior3.5</i>	0.000907734	2.463684889	2714.10
22	<i>bior3.7</i>	0.000900379	2.43627307	2705.83
23	<i>bior3.9</i>	0.000899154	2.429875719	2702.40
24	<i>db7</i>	0.000833424	2.250971746	2700.87
25	<i>coif2</i>	0.00083674	2.147160864	2566.10
26	<i>rbio3.9</i>	0.000849528	1.454172422	1711.74
27	<i>sym6</i>	0.000837401	1.240275733	1481.10
28	<i>bior4.4</i>	0.000841648	1.06036454	1259.87
29	<i>db6</i>	0.000833663	0.975174309	1169.75
30	<i>rbio2.6</i>	0.000839931	0.933217988	1111.07
31	<i>db5</i>	0.00084403	0.885479847	1049.11

**Tabel 4.7** Energi Kumulatif Mode *Fundamental* (Lanjutan)

No	Mother Wavelet	Kumulatif Energi		Rasio (Fero:Normal)
		Normal	Feroresonansi	
32	<i>sym8</i>	0.000835577	0.873479552	1045.36
33	<i>coif3</i>	0.000834117	0.619779075	743.04
34	<i>rbio6.8</i>	0.000834644	0.495939233	594.19
35	<i>rbio2.8</i>	0.000842777	0.394155181	467.69
36	<i>coif4</i>	0.00083179	0.388105589	466.59
37	<i>coif5</i>	0.000828651	0.339806647	410.07
38	<i>bior6.8</i>	0.000833383	0.334998597	401.97
39	<i>db2</i>	59.68817773	451.7351046	7.57
40	<i>sym2</i>	59.68817773	451.7351046	7.57
41	<i>bior2.2</i>	19.87448467	150.1268439	7.55
42	<i>bior2.8</i>	19.8744807	150.0454583	7.55
43	<i>bior2.6</i>	19.87447508	149.9999329	7.55
44	<i>bior2.4</i>	19.8744713	149.9509373	7.54
45	<i>coif1</i>	53.84322293	399.7005898	7.42
46	<i>rbio2.2</i>	178.945925	1302.992291	7.28
47	<i>dmey</i>	6.347993628	11.01758486	1.74
48	<i>bior1.5</i>	8060190.202	13105763.22	1.63
49	<i>bior1.3</i>	8060190.202	13105758.32	1.63
50	<i>haar</i>	8060170.315	13105614.67	1.63
51	<i>db1</i>	8060170.315	13105614.67	1.63
52	<i>bior1.1</i>	8060170.315	13105614.67	1.63
53	<i>rbio1.1</i>	8060170.315	13105614.67	1.63
54	<i>rbio3.1</i>	72540757.21	117944576.90	1.63

Perhitungan energi kumulatif pada mode *quasi-periodic* dapat dilihat pada Tabel 4.9. Dapat diamati pada setiap modenya, pada kondisi normal memiliki kumulatif energi yang sama. Perbedaan terletak pada nilai rasionya. Pada mode *fundamental* dan *subharmonic* nilai rasio maksimum hanya sebesar 13946.64 dan 15360.55 sedangkan pada mode *quasi-periodic* rasio maksimum sebesar 72222.45 pada *mother wavelet* *rbio5.5*. Pada mode *chaotic*, perhitungan energi kumulatif dapat dilihat pada Tabel 4.10. Mode ini memiliki nilai rasio maksimum tertinggi dibandingkan dengan yang lainnya hingga mencapai 454359.59 pada *mother wavelet* *rbio3.3*.

**Tabel 4.8** Energi Kumulatif Mode *Subharmonic*

No	<i>Mother Wavelet</i>	Kumulatif Energi		Rasio (Fero:Normal)
		Normal	Feroresonansi	
1	<i>rbio3.3</i>	<b>0.005783002</b>	<b>88.83009384</b>	<b>15360.55</b>
2	<i>rbio4.4</i>	0.000845236	9.271378337	10968.98
3	<i>rbio2.4</i>	0.000838442	8.846403408	10551.00
4	<i>rbio1.3</i>	0.001314096	13.68217203	10411.85
5	<i>db3</i>	0.00134431	11.86253343	8824.25
6	<i>sym3</i>	0.00134431	11.86253343	8824.25
7	<i>sym4</i>	0.000839154	6.082700543	7248.61
8	<i>rbio3.5</i>	0.000852831	6.1580421	7220.70
9	<i>rbio5.5</i>	0.000863667	6.086175869	7046.90
10	<i>coif2</i>	0.00083674	5.496463803	6568.90
11	<i>bior4.4</i>	0.000841648	4.114711671	4888.87
12	<i>rbio2.6</i>	0.000839931	3.949166719	4701.78
13	<i>db4</i>	0.000853336	3.678977217	4311.29
14	<i>sym6</i>	0.000837401	3.50694013	4187.89
15	<i>sym5</i>	0.000849233	3.462344062	4077.02
16	<i>db6</i>	0.000833663	3.345290478	4012.76
17	<i>db5</i>	0.00084403	3.322559781	3936.54
18	<i>rbio1.5</i>	0.00089988	3.475732311	3862.44
19	<i>coif3</i>	0.000834117	3.201624153	3838.34
20	<i>rbio6.8</i>	0.000834644	3.083728793	3694.66
21	<i>db7</i>	0.000833424	2.865179392	3437.84
22	<i>rbio2.8</i>	0.000842777	2.870280475	3405.74
23	<i>sym8</i>	0.000835577	2.772941802	3318.59
24	<i>bior6.8</i>	0.000833383	2.729199206	3274.85
25	<i>coif4</i>	0.00083179	2.545243416	3059.96
26	<i>bior3.3</i>	0.000939011	2.851508264	3036.71
27	<i>bior3.5</i>	0.000907734	2.748925451	3028.34
28	<i>bior3.7</i>	0.000900379	2.720598332	3021.61
29	<i>bior3.9</i>	0.000899154	2.714206964	3018.62
30	<i>bior3.1</i>	0.001137009	3.423434338	3010.91
31	<i>rbio3.7</i>	0.000849057	2.437051584	2870.30
32	<i>coif5</i>	0.000828651	2.223229778	2682.95
33	<i>db8</i>	0.000846441	1.97101127	2328.59
34	<i>rbio3.9</i>	0.000849528	1.532786114	1804.28
35	<i>db9</i>	0.000864831	1.118376395	1293.17
36	<i>bior5.5</i>	0.000884969	0.94027282	1062.49
37	<i>sym7</i>	0.000866792	0.885625339	1021.73

**Tabel 4.8** Energi Kumulatif Mode *Subharmonic* (Lanjutan)

No	Mother Wavelet	Kumulatif Energi		Rasio (Fero:Normal)
		Normal	Feroresonansi	
38	<i>db10</i>	0.000874957	0.71884588	821.58
39	<i>bior2.2</i>	19.87448467	575.1568859	28.94
40	<i>bior2.8</i>	19.8744807	575.0564528	28.93
41	<i>bior2.6</i>	19.87447508	574.973119	28.93
42	<i>bior2.4</i>	19.8744713	574.90418	28.93
43	<i>coif1</i>	53.84322293	1542.049809	28.64
44	<i>db2</i>	59.68817773	1701.360435	28.50
45	<i>sym2</i>	59.68817773	1701.360435	28.50
46	<i>rbio2.2</i>	178.945925	5082.627268	28.40
47	<i>bior1.5</i>	8060190.202	14720415.03	1.83
48	<i>bior1.3</i>	8060190.202	14720409.44	1.83
49	<i>haar</i>	8060170.315	14719847.21	1.83
50	<i>db1</i>	8060170.315	14719847.21	1.83
51	<i>bior1.1</i>	8060170.315	14719847.21	1.83
52	<i>rbio1.1</i>	8060170.315	14719847.21	1.83
53	<i>rbio3.1</i>	72540757.21	132456503.4	1.83
54	<i>dmey</i>	6.347993628	11.49717171	1.81

**Tabel 4.9** Energi Kumulatif Mode *Quasi-Periodic*

No	Mother Wavelet	Kumulatif Energi		Rasio (Fero:Normal)
		Normal	Feroresonansi	
1	<i>rbio5.5</i>	0.000863667	62.37611739	72222.45
2	<i>rbio1.3</i>	0.001314096	74.7049579	56848.92
<b>3</b>	<b><i>rbio3.3</i></b>	<b>0.005783002</b>	<b>328.0048708</b>	<b>56718.79</b>
4	<i>db3</i>	0.00134431	70.58944737	52509.78
5	<i>sym3</i>	0.00134431	70.58944737	52509.78
6	<i>sym5</i>	0.000849233	35.89146295	42263.37
7	<i>rbio3.5</i>	0.000852831	33.42235205	39189.88
8	<i>rbio4.4</i>	0.000845236	32.0035967	37863.50
9	<i>rbio1.5</i>	0.00089988	33.5814866	37317.75
10	<i>rbio2.4</i>	0.000838442	29.87356708	35629.86
11	<i>db8</i>	0.000846441	27.60224516	32609.78
12	<i>sym4</i>	0.000839154	26.02927905	31018.47
13	<i>db9</i>	0.000864831	25.87321665	29917.08
14	<i>bior5.5</i>	0.000884969	26.46215981	29901.80



**Tabel 4.9** Energi Kumulatif Mode *Quasi-Periodic* (Lanjutan)

No	Mother Wavelet	Kumulatif Energi		Rasio (Fero:Normal)
		Normal	Feroresonansi	
15	<i>db7</i>	0.000833424	23.13830148	27762.95
16	<i>sym7</i>	0.000866792	22.36567957	25802.82
17	<i>db4</i>	0.000853336	21.48278617	25175.06
18	<i>coif2</i>	0.00083674	20.26795429	24222.53
19	<i>db10</i>	0.000874957	19.29787418	22055.79
20	<i>sym6</i>	0.000837401	18.03665651	21538.85
21	<i>rbio3.7</i>	0.000849057	18.21956959	21458.58
22	<i>bior3.3</i>	0.000939011	17.84827135	19007.52
23	<i>bior3.5</i>	0.000907734	17.13035892	18871.56
24	<i>db6</i>	0.000833663	15.70877409	18843.08
25	<i>bior3.7</i>	0.000900379	16.89619252	18765.64
26	<i>sym8</i>	0.000835577	15.64655233	18725.44
27	<i>bior3.9</i>	0.000899154	16.83337215	18721.35
28	<i>rbio2.6</i>	0.000839931	15.56029782	18525.70
29	<i>bior3.1</i>	0.001137009	20.73991399	18240.77
30	<i>bior4.4</i>	0.000841648	15.0794979	17916.63
31	<i>coif3</i>	0.000834117	13.92050618	16688.90
32	<i>rbio3.9</i>	0.000849528	13.71651729	16146.04
33	<i>rbio6.8</i>	0.000834644	13.29688782	15931.20
34	<i>rbio2.8</i>	0.000842777	12.52698234	14863.93
35	<i>coif4</i>	0.00083179	12.24980808	14727.04
36	<i>db5</i>	0.00084403	12.28863424	14559.47
37	<i>bior6.8</i>	0.000833383	11.79744692	14156.10
38	<i>coif5</i>	0.000828651	11.57345057	13966.62
39	<i>bior2.2</i>	19.87448467	2211.377712	111.27
40	<i>bior2.8</i>	19.8744807	2211.117247	111.25
41	<i>bior2.6</i>	19.87447508	2210.805001	111.24
42	<i>bior2.4</i>	19.8744713	2210.580222	111.23
43	<i>db2</i>	59.68817773	6619.030521	110.89
44	<i>sym2</i>	59.68817773	6619.030521	110.89
45	<i>coif1</i>	53.84322293	5943.666932	110.39
46	<i>rbio2.2</i>	178.945925	19613.7153	109.61
47	<i>bior1.5</i>	8060190.202	111348289.6	13.81
48	<i>bior1.3</i>	8060190.202	111348268.1	13.81
49	<i>haar</i>	8060170.315	111346094.3	13.81
50	<i>db1</i>	8060170.315	111346094.3	13.81
51	<i>bior1.1</i>	8060170.315	111346094.3	13.81

**Tabel 4.9** Energi Kumulatif Mode *Quasi-Periodic* (Lanjutan)

No	Mother Wavelet	Kumulatif Energi		Rasio (Fero:Normal)
		Normal	Feroresonansi	
52	<i>rbio1.1</i>	8060170.315	111346094.3	13.81
53	<i>rbio3.1</i>	72540757.21	1002019118	13.81
54	<i>dmey</i>	6.34799367	37.00217671	5.83

**Tabel 4.10** Energi Kumulatif Mode *Chaotic*

No	Mother Wavelet	Kumulatif Energi		Rasio (Fero:Normal)
		Normal	Feroresonansi	
<b>1</b>	<b><i>rbio3.3</i></b>	<b>0.005783002</b>	<b>2627.562518</b>	<b>454359.59</b>
2	<i>db3</i>	0.00134431	321.4463852	239116.18
3	<i>sym3</i>	0.00134431	321.4463852	239116.18
4	<i>rbio1.3</i>	0.001314096	267.4661855	203536.20
5	<i>rbio2.4</i>	0.000838442	108.29617	129163.59
6	<i>rbio4.4</i>	0.000845236	109.0417473	129007.45
7	<i>rbio3.5</i>	0.000852831	102.8309727	120576.00
8	<i>db4</i>	0.000853336	79.86976339	93597.09
9	<i>bior3.5</i>	0.000907734	82.82605956	91244.82
10	<i>bior3.7</i>	0.000900379	82.00720337	91080.74
11	<i>bior3.9</i>	0.000899154	81.77592478	90947.67
12	<i>bior3.3</i>	0.000939011	85.30789832	90848.66
13	<i>rbio5.5</i>	0.000863667	77.89636892	90192.63
14	<i>bior3.1</i>	0.001137009	97.16948035	85460.64
15	<i>coif2</i>	0.00083674	65.25374312	77985.70
16	<i>rbio3.7</i>	0.000849057	63.30597125	74560.29
17	<i>sym4</i>	0.000839154	62.36208352	74315.39
18	<i>db5</i>	0.00084403	59.63644422	70656.76
19	<i>bior4.4</i>	0.000841648	54.03791442	64204.86
20	<i>rbio2.6</i>	0.000839931	50.42635913	60036.34
21	<i>rbio3.9</i>	0.000849528	50.75173595	59741.09
22	<i>rbio6.8</i>	0.000834644	42.95299083	51462.62
23	<i>coif3</i>	0.000834117	41.35647585	49581.12
24	<i>db6</i>	0.000833663	40.86150183	49014.43
25	<i>rbio2.8</i>	0.000842777	40.87109783	48495.73
26	<i>bior6.8</i>	0.000833383	39.11806657	46938.90
27	<i>sym6</i>	0.000837401	36.80989799	43957.30
28	<i>coif4</i>	0.00083179	35.57306323	42766.87

**Tabel 4.10** Energi Kumulatif Mode *Chaotic* (Lanjutan)

No	<i>Mother Wavelet</i>	Kumulatif Energi		Rasio (Fero:Normal)
		Normal	Feroresonansi	
29	<i>coif5</i>	0.000828651	32.59899556	39339.85
30	<i>sym7</i>	0.000866792	33.63333493	38802.08
31	<i>sym8</i>	0.000835577	31.45699628	37647.02
32	<i>db10</i>	0.000874957	28.40806099	32467.94
33	<i>db7</i>	0.000833424	23.91290826	28692.37
34	<i>bior5.5</i>	0.000884969	23.55633413	26618.26
35	<i>sym5</i>	0.000849233	21.81176587	25684.07
36	<i>rbio1.5</i>	0.00089988	22.34341212	24829.33
37	<i>db9</i>	0.000864831	19.19058788	22189.99
38	<i>db8</i>	0.000846441	16.1541198	19084.76
39	<i>bior2.2</i>	19.87448467	6355.432272	319.78
40	<i>bior2.8</i>	19.8744807	6353.685393	319.69
41	<i>bior2.6</i>	19.87447508	6352.843383	319.65
42	<i>bior2.4</i>	19.8744713	6352.227259	319.62
43	<i>coif1</i>	53.84322293	16930.46931	314.44
44	<i>db2</i>	59.68817773	18562.68098	310.99
45	<i>sym2</i>	59.68817773	18562.68098	310.99
46	<i>rbio2.2</i>	178.945925	55298.90808	309.03
47	<i>bior1.5</i>	8060190.202	37036498.18	4.59
48	<i>bior1.3</i>	8060190.202	37036336.28	4.59
49	<i>haar</i>	8060170.315	37030249.42	4.59
50	<i>db1</i>	8060170.315	37030249.42	4.59
51	<i>bior1.1</i>	8060170.315	37030249.42	4.59
52	<i>rbio1.1</i>	8060170.315	37030249.42	4.59
53	<i>rbio3.1</i>	72540757.21	333065705.1	4.59
54	<i>dmey</i>	6.347993628	28.81125759	4.54

Dari keempat mode feroresonansi , *mother wavelet rbio3.3* memberikan hasil rasio kumulatif energi yang lebih baik dibandingkan dengan yang lainnya, hal ini dapat dilihat secara konsisten *rbio3.3* selalu masuk posisi atas pada setiap mode feroresonansi. Beberapa *mother wavelet* juga menunjukkan rasio dengan selisih yang besar dengan yang lainnya yaitu nilai rasio yang konsisten kecil pada setiap modenya. Hal ini menunjukkan beberapa *mother wavelet* tidak dapat menunjukkan perbedaan yang signifikan pada kondisi normal dan kondisi feroresonansi. Beberapa *mother wavelet* tersebut ialah *dmey*, *haar*, *db1*, *bior1.1*, *rbio1.1*, *bior1.3*, *bior1.5* dan *rbio3.1*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil data dan analisis yang sudah dilakukan pada studi pemilihan basis wavelet untuk deteksi gejala feroresonansi, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode analisis transformasi *wavelet* dapat mendeteksi adanya ketidaknormalan pada suatu sinyal. Ketidaknormalan suatu sinyal ditunjukkan dengan perubahan yang signifikan pada nilai koefisien detail hasil transformasi *wavelet*.
2. Hasil transformasi *wavelet* dapat digunakan untuk membedakan kondisi transien dan *steady state* pada suatu sinyal feroresonansi.
3. Pada feroresonansi mode *fundamental*, *mother wavelet coif5*, *rbio3.7* dan *rbio3.9* mendeteksi feroresonansi tercepat yaitu dalam waktu 0.00107s sesaat setelah *switching* dilakukan dan menunjukkan kenaikan nilai koefisien detail yang signifikan.
4. Pada feroresonansi mode *subharmonic*, *mother wavelet coif5* mendeteksi feroresonansi tercepat yaitu dalam waktu 0.00308s sesaat setelah *switching* dilakukan dan menunjukkan kenaikan nilai detail koefisien yang signifikan.
5. Pada feroresonansi mode *quasi-periodic*, *mother wavelet dmey* mendeteksi feroresonansi tercepat yaitu dalam waktu 0.00027s sesaat setelah *switching* dilakukan, namun dengan nilai kenaikan nilai koefisien detail yang tidak signifikan. *Mother wavelet bior3.5* dapat mendeteksi dalam waktu 0.00044s dengan kenaikan nilai koefisien detail yang signifikan.
6. Pada feroresonansi mode *chaotic*, *mother wavelet rbio3.9* mendeteksi feroresonansi tercepat yaitu dalam waktu 0.00714s sesaat setelah *switching* dilakukan dan menunjukkan kenaikan nilai detail koefisien yang signifikan.
7. Secara keseluruhan pada deteksi feroresonansi metode koefisien detail, *mother wavelet coif5* menunjukkan performansi yang lebih baik dari pada yang lain dengan konsisten mendeteksi feroresonansi lebih cepat dan dengan kenaikan nilai koefisien detail yang signifikan. Disusul oleh *rbio3.9*, *coif4*, *rbio3.7*, *db6*, *db7* dan *bior6.8*.

8. Pada deteksi feroresonansi metode energi kumulatif, *mother wavelet rbio3.3* menunjukkan performansi yang lebih baik dibanding yang lainnya dengan menunjukkan nilai rasio yang lebih besar dengan konsisten pada setiap modenya.
9. Beberapa *mother wavelet* menunjukkan performansi yang buruk dalam mendeteksi feroresonansi dengan menunjukkan selisih waktu deteksi yang cukup signifikan dibandingkan dengan *mother wavelet* lainnya dan nilai rasio energi kumulatif yang rendah. *Mother wavelet* yang tidak direkomendasikan untuk mendeteksi gejala feroresonansi adalah sebagai berikut: *dmey*, *haar*, *db1*, *bior1.1*, *rbio1.1*, *bior1.3*, *bior1.5* dan *rbio3.1*.

## 5.2 Saran

Berdasarkan studi yang telah dilakukan , berikut ini beberapa saran yang dapat penulis berikan :

1. Pada studi ini keterbatasan dalam sampel feroresonansi menjadi batasan akurasi hasil pemilihan basis/*mother wavelet* yang didapatkan. Untuk itu, pada studi yang mungkin akan dilakukan selanjutnya bisa dengan memperbanyak sampel data sinyal feroresonansi agar hasil yang didapat lebih akurat.
2. Dikarenakan data yang diambil pada studi ini berasal dari simulasi, untuk itu perlu juga adanya penerapan hasil studi ini dengan data yang sebenarnya untuk membuktikan hasil yang telah didapat.
3. Pendeteksian feroresonansi merupakan salah satu dari aplikasi transformasi *wavelet*, transformasi *wavelet* juga dapat digunakan untuk analisa lainnya terutama dalam menganalisa gangguan pada suatu sinyal.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zuhal, 1996, “Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya”, Gramedia, Jakarta.
- [2] Yon Rijono, “Dasar Teknik Listrik”, Penerbit Andi, Yogyakarta, 1997.
- [3] J.J. Grainger dan W.D. Stevenson, 1994, “Power System Analysis”, McGraw-Hill, Singapore.
- [4] Tobing, Bonggas L, “Peralatan Tegangan Tinggi”, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta 2013.
- [5] Chapman, S.J., (2005), “Electric Machinery Fundamentals”, McGraw Hill.
- [6] P. Ferracci, “Ferroresonance,” Group Schneider: Cahier no 190. pp. 1–28, 1998.
- [7] H. A. Sharbain, A. Osman, and A. El-Hag, “Detection and identification of ferroresonance,” in 2017 7th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO), 2017, vol. 1, pp. 1–4.
- [8] T. C. Akinci, N. Ekren, S. Seker, and S. Yildirim, “Continuous wavelet transform for ferroresonance phenomena in electric power systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, no. 1, pp. 403–409, 2013.
- [9] S. D. Kisdarmawan, D. A. Asfani, J. T. Elektro, and F. T. Industri, “Analisis Deteksi Ferroresonansi menggunakan Transformasi Wavelet pada Sistem Transmisi,” no. 1, pp. 2–6.
- [10] S. Beheshtaein, “Application of wavelet-base method and DT in detection of ferroresonance from other transient phenomena,” *INISTA 2012 - Int. Symp. Innov. Intell. Syst. Appl.*, 2012.
- [11] P.-Y. Guo, C.-Z. Li, S. Yan, J. Liangcheng, and J.-Y. Zhang, “Application of wavelet transform in ferroresonance detection,” in 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011, pp. 3800–3803.
- [12] Z. He, *Wavelet analysis and transient signal processing applications for power systems*. Hoboken, NJ: Wiley, 2016.
- [13] J. Gomes and L. Velho, *From Fourier Analysis to Wavelets*. Cham: Springer International Publishing, 2015.

- [14] L. Debnath and F. A. Shah, *Wavelet Transforms and Their Applications*. Boston, MA: Birkhäuser Boston, 2015.
- [15] G. Bachman, L. Narici, and E. Beckenstein, *Fourier and wavelet analysis*. New York: Springer, 2000.
- [16] A. Boggess and F. J. Narcowich, *A first course in wavelets with Fourier analysis*, 2nd ed. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2009.
- [17] A. J. M. V. Valverde, I. Zamora, G. Buigues, "Ferroresonance in Voltage Transformer: Analysis and Simulations," *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ)*, 2007.
- [18] D. C. Robertson, O. I. Camps, J. S. Mayer, and W. B. Gish Sr, "Wavelets and electromagnetic power system transients," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.11, pp. 1050-1056, 1996.
- [19] A. Gaouda, M. Salama, M. Sultan, and A. Chikhani, "Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 14, pp. 1469-1476, 1999.
- [20] W. A. Wilkinson and M. D. Cox, "Discrete wavelet analysis of power system transients," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 2038-2044, 1996.
- [21] S. Santoso, E. J. Powers, W. M. Grady, and P. Hofmann, "Power quality assessment via wavelet transform analysis," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 11, pp. 924-930, 1996.
- [22] D. R. O. I. C. J. Meyer, "Wavelets and Power System Transients: Feature Detection and Classification," *SPIE*, vol. 2242 *Wavelet Application*, pp. 474-487, 1994.
- [23] S. Santoso, E. J. Powers, and W. M. Grady, "Electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis," in *Time-Frequency and Time-Scale Analysis, 1994.*, *Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on*, 1994, pp. 166-169.
- [24] K. Chul-Hwan and R. Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems. II. Example of application to actual power system transients," *Power Engineering Journal*, vol. 15, pp. 193-202, 2001.
- [25] D. L. Fugal, *Conceptual Wavelets in Digital Signal Processing S&ST*, 2009.
- [26] Z. Ali, "Development Of Numerical Algorithms For Ferroresonance Monitoring" *The University of Manchester*, 2015.



- [27] S. P. Ang, "Ferroresonance Simulation Studies on Transmission Systems," Doctor of Philosophy, School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Manchester, Manchester, 2010.
- [28] IMY Negara, IGNS Hernanda, DA Asfani, D Fahmi, Y Afif, M Wahyudi "Ferroresonance characteristics in unsymmetrical flux distribution of 150 KV three phase transformer" IEEE TENCON Region 10 Conference, p. 78-81, 2017
- [29] M Wahyudi, IMY Negara, DA Asfani, IGNS Hernanda, D Fahmi "Application of wavelet cumulative energy and artificial neural network for classification of ferroresonance signal during symmetrical and unsymmetrical switching of three-phases distribution transformer" International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), 2017
- [30] IGNS Hernanda, IMY Negara, A Soeprijanto, DA Asfani, M Wahyudi, Surya Dwi Kisdarmawan, Daniar Fahmi "Ferroresonance Signal Analysis with Wavelet Transform on 500 kV Transmission Lines Capacitive Voltage Transformers" Journal on Advanced Research in Electrical Engineering Vol.1(1), 2017
- [31] IGN Satriyadi, IMY Negara, D Fahmi, N Wijayanto, M Wahyudi, DA Asfani, Adi Soeprijanto "Ferroresonance Characteristics on Capacitive Voltage Transformer Under Lightning Impulse Voltage" International Review on Modelling and Simulations (IREMOS) vol.9(4), p.306-311, 2016
- [32] IGN Satriyadi, IMY Negara, D Fahmi, DA Asfani, SS Simamora "Study on damping reactor installation to address ferroresonance on incoming 20 kV GIS" International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2016
- [33] Huang, Chun-Wei, Jyh-Cherng Gu, and Ming-Ta Yang. "Applying Wavelet Transform to Ferroresonance Detection and Protection." World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering 8.7 (2014): 1122-1129.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN

### 1. Listing Program pada MATLAB

```
wname={'haar';
'db1'; 'db2'; 'db3'; 'db4'; 'db5'; 'db6'; 'db7'; 'db8';
'db9'; 'db10';
'sym2'; 'sym3'; 'sym4'; 'sym5'; 'sym6'; 'sym7'; 'sym8';
'coif1'; 'coif2'; 'coif3'; 'coif4'; 'coif5';
'bior1.1'; 'bior1.3'; 'bior1.5'; 'bior2.2'; 'bior2.4';
'bior2.6'; 'bior2.8'; 'bior3.1';
'bior3.3'; 'bior3.5'; 'bior3.7'; 'bior3.9';
'bior4.4'; 'bior5.5'; 'bior6.8';
'rbio1.1'; 'rbio1.3'; 'rbio1.5'; 'rbio2.2';
'rbio2.4'; 'rbio2.6';
'rbio2.8'; 'rbio3.1'; 'rbio3.3'; 'rbio3.5';
'rbio3.7'; 'rbio3.9'; 'rbio4.4'; 'rbio5.5';
'rbio6.8';
'dmey'};

s =Fundamental; %sinyal input
for m=1:54;
    w=wname{m,1};
    [c,l] = wavedec(s,1,w);
    Y(1:50001,m) = wrcoef('d',c,l,w,1);
    z= abs(Y);
    x(m,1) = max(z(100:10000,m)); %cari threshold
    Hs1(1:50000,m)=Y(1:50000,m);
    for t=8000:50001
        if abs(Y(t,m))>1.00001*x(m,1); %deteksi
            V(m,1)=(t/100000); %simpan waktu dtksi
            V(m,2)=abs(Y(t,m)); %koefisien dtksi
            break
        else
            end
    end
end
```

```

%energy cumulative
    X = Y(1:50001,m).^2;
    A = sum(X(8001:10000));%2000 data sebelum
switching
    B = sum(X(10001:12000));%2000 setelah
switching
    C = B/A ;
    CE(m,1) = A;
    CE(m,2) = B;
    CE(m,3) = C;
end
clearvars A B C X w t c l

```

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Verdiansyah, lahir di Batam pada tanggal 21 Juni 1996. Penulis merupakan anak kedua dari lima bersaudara. Selama perkuliahan penulis aktif dalam kegiatan organisasi yaitu sebagai kepala biro sosial keprofesian departemen pengabdian masyarakat Himatektro Sigap periode 2016/2017, sebagai staff departemen pengabdian masyarakat Himatektro Super periode 2015/2016 dan sempat menjadi ketua Elektroda pada tahun 2016. Selain itu, penulis yang mempunyai hobi menonton film

ini juga aktif dalam kepeemanduan di ITS. Penulis merupakan Pemandu FTI-ITS angkatan 2015 dan sempat diberi amanah sebagai koordinator pemandu pada LKMM Pra-TD XIV FTI-ITS. Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan sarjana teknik elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pendidikan formal yang telah ditempuh penulis yaitu:

1. SDN 001 Batu Ampar, Batam
2. SMP Negeri 4 Batam
3. SMA Negeri 8 Batam

Penulis dapat dihubungi di email : [verdie.nast@gmail.com](mailto:verdie.nast@gmail.com)